

Вестник Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

Серия 5

ГЕОГРАФИЯ

№ 5 • 2022 • СЕНТЯБРЬ–ОКТАБРЬ

Издательство Московского университета

Выходит один раз в два месяца

СОДЕРЖАНИЕ

Методы географических исследований

- Асеева Е.Н., Самонова О.А. Сравнительный анализ результатов определения химических элементов в фоновых лесных почвах разными спектральными методами..... 3
- Коньшиев Е.В. Методика изучения ментального туристско-рекреационного пространства по отзывам туристов (на примере Кировской области)..... 16

Динамика природных процессов

- Чалов Р.С., Куракова А.А., Михайлова Н.М., Рулева С.Н. Размывы пойменных берегов и эволюция форм русел рек как факторы перестройки русловой сети..... 29
- Назаров Н.Н., Фролова И.В. Возраст и современное развитие ландшафтов Камско-Кельтминской низменности (бассейн верхней Камы)..... 41

География и экология

- Замятина Н.Ю., Котов Е.А., Гончаров Р.В., Бурцева А.В., Гребенец В.И., Медведков А.А., Молодцова В.А., Ключева В.П., Кульчицкий Ю.В., Миронова Б.А., Никитин Б.В., Пилясов А.Н., Поляченко А.Е., Потураева А.В., Стрелецкий Д.А., Шамало И.А. Оценка потенциала жизнестойкости городов Российской Арктики..... 52
- Леонова Н.Б., Горяинова И.Н., Бочарников М.В. Структура ареалов бореальных видов растений на примере линнеевой северной и майника двулистного в пределах Европейской России..... 66

География мирового хозяйства

- Потапова А.А., Наумов А.С. Пространственно-временной анализ занятости в сельском хозяйстве в странах мира..... 76
- Сдасюк Г.В., Алексеева Н.Н. Развитие переходной энергетики в Индии: достижения, проблемы, перспективы..... 91

Региональные исследования

- Семиколенных Д.В., Курбанов Р.Н., Янина Т.А. Возраст хвалынского пролива в позднеледникового периода истории Маньчжурской депрессии..... 103
- Крашенинникова С.Б., Шокурова И.Г., Демидов А.Н. Особенности поверхностной циркуляции в Северной Атлантике при изменениях ледовитости Баренцева моря..... 113
- Руденко О.В., Талденкова Е.Е., Шкарубо С.И., Руденко А.А. Изменения природной среды Центральной впадины Баренцева моря в позднеледниковье – голоцене..... 123
- Хорошев А.В., Дьяконов К.Н., Воловинский И.В., Бочкарев Ю.Н., Подгорный О.М. Роль морфометрических и климатических факторов в изменчивости функционирования геосистем в северной тайге Западной Сибири..... 140

CONTENTS

Methods of geographical studies

<i>Aseyeva E.N., Samonova O.A.</i> Comparison of results obtained through the analysis of chemical elements in background forest soils by different spectroscopy methods	3
<i>Konyshov E.V.</i> Methods of studying mental tourist-recreation space basing on tourist reviews (case study of the Kirov region)	16

Dynamics of natural processes

<i>Chalov R.S., Kurakova A.A., Mihajlova N.M., Ruleva S.N.</i> Riverbank erosion and evolution of channel forms as factors of river channel network transformation	29
<i>Nazarov N.N., Frolova I.F.</i> Age and recent evolution of landscape elements of the Kama-Keltma lowland (the Upper Kama River basin)	41

Geography and ecology

<i>Zamiatina N.Yu., Kotov E.A., Goncharov R.V., Burceva A.V., Grebenets V.I., Medvedkov A.A., Molodtsova V.A., Klyueva V.P., Kul'chitskii Yu.V., Mironova B.A., Nikitin B.V., Pilyasov A.N., Polyachenko A.E., Poturaeva A.V., Streletskii D.A., Shamalo I.A.</i> Resilience potential of the Russian Arctic cities	52
<i>Leonova N.B., Goryainova I.N., Bocharnikov M.V.</i> Structure of the areas of boreal plant species within European Russia (case study of north twinflower and two-leaved mullet)	66

Geography of world economy

<i>Potapova A.A., Naumov A.S.</i> Spatio-temporal analysis of agricultural employment in the countries of the world	76
<i>Sdasyuk G.V., Alekseeva N.N.</i> Development of transitional energy in India: achievements, challenges and prospects	91

Regional studies

<i>Semikolennykh D.V., Kurbanov R.N., Yanina T.A.</i> Dating the Khvalynian Strait within the Late Pleistocene history of the Manych depression	103
<i>Krasheninnikova S.B., Shokurova I.G., Demidov A.N.</i> Features of surface circulation in the North Atlantic during the changes in the ice cover of the Barents Sea	113
<i>Rudenko O.V., Taldenkova E.E., Shkarubo S.I., Rudenko A.A.</i> Environmental changes in the Central Deep of the Barents Sea during the late glacial and the Holocene	123
<i>Khoroshev A.V., Dyakonov K.N., Volovinsky I.V., Bochkarev Yu.N., Podgorny O.M.</i> Contribution of morphometric and climatic factors to the variability of geosystems functioning in the Northern taiga of Western Siberia	140

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 631.435:550.4(440.318)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ФОНОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ РАЗНЫМИ СПЕКТРАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

Е.Н. Асеева¹, О.А. Самонова²^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра геохимии ландшафтов и географии почв*¹ *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: asejeva@mail.ru*² *Канд. геогр. наук; e-mail: oasamonova@mail.ru*

Изучено содержание Fe, Mn, Ti, Zr, Ni, Co, Cr, Zn, Pb в почвенной массе и в гранулометрических фракциях: 1–0,25, 0,25–0,05, 0,05–0,01, 0,01–0,001, <0,001 мм гумусовых горизонтов почв, типичных для юго-восточной части Смоленско-Московской возвышенности. Содержание элементов в дерново-подзолистых суглинистых почвах на покровных и делювиальных суглинках, дерновых почвах склонов и днищ малых эрозионных форм определялось двумя методами: дуговым атомно-эмиссионным спектральным (АЭС-ДР), а также атомно-эмиссионным спектральным с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) и масс-спектральным с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). По данным ИСП-методов по сравнению с данными АЭС-ДР-метода содержание элементов в почвах оказалось более высоким: Mn – во фракции 0,25–0,05 мм; Fe и Ni – во фракции 0,05–0,01 мм; Fe, Ni, Co – во фракции 0,01–0,001 мм; Fe, Ni, Cr, Zn, Co – во фракции <0,001 мм. Метод анализа не повлиял на содержание: Fe и Ni – во фракции 0,25–0,05 мм; Co – во фракции 0,05–0,01 мм; Mn и Zn – во фракции 0,01–0,001 мм; Mn, Ti и Cu – во фракции <0,001 мм. В крупных гранулометрических фракциях содержание элементов, выявленное АЭС-ДР-методом, более высокое, чем определенное ИСП-методами, вследствие преобладания в них минеральных форм соединений. В илистой фракции, где содержание подвижных форм элементов максимально, результаты ИСП-методов слабо превышают данные АЭС-ДР-анализа или не отличаются от него. Регрессионный анализ показал корреляцию двух методов определения содержания элементов при рассмотрении широкого диапазона их концентраций. Применение полученных уравнений для прогноза содержания элементов может быть ограничено непостоянством дисперсии случайной ошибки регрессионной модели. По результатам обоих видов анализа, распределение содержания по гранулометрическим фракциям в почвенной массе полностью совпадает для Mn, Co, Pb, Zr, Cu и слабо различается для Zn, Fe, Ti, Ni – максимальные и минимальные концентрации этих элементов выявлены в одинаковых фракциях. Метод анализа максимально повлиял на гранулометрическое фракционирование Cr.

Ключевые слова: валовое содержание металлов, дерново-подзолистые почвы, гранулометрические фракции, АЭС-ДР- и ИСП-АЭС/МС-методы анализа

ВВЕДЕНИЕ

При изучении загрязнения окружающей среды большое внимание уделяется надежности и точности определения содержания потенциально токсичных элементов в природных средах. В середине и конце XX в. в геологии, почвоведении и геохимии ландшафтов [Зырин, Обухов, 1977] широко применялся дуговой атомно-эмиссионный спектральный анализ (АЭС-ДР). АЭС-ДР-методом охарактеризовано содержание микроэлементов в почвах европейской части СССР, установлены закономерности варьирования их содержания [Микроэлементы..., 1973; Химия..., 1985]. Эколого-геохимические исследования городских территорий, начатые в середине 1970-х гг.,

также опирались на данные спектральных методов анализа. Под руководством Ю.Е. Саета в Институте минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ) этим методом получены данные о распределении металлов на территории Москвы и ее лесопарковой зоны [Сает и др., 1990]. Аналогичные работы получили широкое распространение на территории бывшего СССР: в промышленно-урбанизированных и сельскохозяйственных районах Армении, Казахстана, Латвии, Литвы, Эстонии. Накоплен обширный фактический материал, который может быть использован для оценки степени техногенной трансформации урбанизированных и сельскохозяйственных территорий в последующие годы.

В настоящее время особое внимание уделяется оценке содержания приоритетных загрязнителей в отдельных гранулометрических фракциях почвенной массы, особенно в пылеватых фракциях, присутствующих в атмосферном воздухе городов и оказывающих непосредственное влияние на здоровье населения [Ajmone-Marsan et al., 2008; Власов и др., 2015; Zhang et al., 2019]. Источником таких частиц является верхний почвенный слой в городах и гумусовый горизонт в фоновых почвах.

В конце XX в. для анализа горных пород, почв, растений и донных осадков стали широко использоваться методы атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), которые в настоящее время играют ведущую роль в исследовании почв. Методы ИСП-АЭС и ИСП-МС (далее по тексту ИСП) позволяют получать концентрацию 70 элементов в диапазоне до 100% при соответствующем разбавлении проб.

Анализ пространственно-временных трендов загрязнения компонентов окружающей среды с использованием результатов, полученных методом АЭС-ДР, требует оценки его совместимости (сходства результатов) с методами, применяющимися в настоящее время. Информация о корреляции результатов этих методов необходима для адекватной оценки геохимических изменений почвенного покрова за последние 30–50 лет. В иностранной литературе представлено сравнение результатов рентгенофлуоресцентного анализа (РФА), не требующего перевода твердых проб в жидкую фазу, и спектрометрических методов с использованием ИСП [Congiu et al., 2013; Amorosi, Sammartino, 2011; Kim et al., 2019]. Оба метода дают хорошую корреляцию по Pb и As [Kim et al., 2019], сопоставимые результаты в анализе почв и донных осадков получены по Cd, As, V и Ni, но большие расхождения выявлены по Cr, что объясняется неполным его извлечением кислотами при подготовке проб к ИСП-анализу [Congiu et al., 2013]. Аналогичные результаты для Cr продемонстрированы в [Amorosi, Sammartino, 2011]. В методической работе И. Е. Васильевой и Е. В. Шабановой [2019] приведено сравнение содержания микроэлементов по зашифрованным стандартным образцам растительного происхождения, выполненное АЭС-ДР- и ИСП-методами. Обнаружено, что для большинства элементов их концентрации, найденные по двум методикам, хорошо согласуются с аттестованными значениями в широких диапазонах значений. В настоящей статье представлена сравнительная характеристика данных, полученных АЭС-ДР- и ИСП-методами для гумусовых горизонтов фоновых лесных почв в средней части бассейна р. Протвы (центральный регион России). Опреде-

ление содержания элементов этими методами выполнялось в 2015–2016 гг. Результаты исследования помогут корректно оценивать различие содержания элементов, определенное в последние десятилетия методами ИСП с предшествующей информацией, полученной АЭС-ДР-методом, т.е. максимально использовать имеющиеся базы геохимических данных.

Цель работы – сравнить валовое содержание Fe, Mn, Ti, Zr, Ni, Co, Cr, Zn, Cu, Pb в почвенной массе и в гранулометрических фракциях гумусовых горизонтов фоновых лесных почв, проанализированное двумя методами: дуговым спектральным атомно-эмиссионным (АЭС-ДР), атомно-эмиссионным спектральным с индуктивно-связанной плазмой и масс-спектральным с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС/МС). Целью исследования также являлась оценка влияния данных методов на характер распределения содержания элементов по гранулометрическим фракциям в почвенной массе (гранулометрическое фракционирование).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовано содержание Fe, Mn, Ti, Zr, Ni, Co, Cr, Zn, Cu, Pb в почвенной массе и в гранулометрических фракциях: 1–0,25 (G1), 0,25–0,05 (G2), 0,05–0,01 (G3), 0,01–0,001 (G4), <0,001 мм (G5) гумусовых горизонтов почв, типичных для левобережной части долины р. Протвы (рис. 1). Участок исследования расположен в 90 км юго-западнее Москвы, в юго-восточной части Смоленско-Московской возвышенности, в центральной части бассейна р. Протвы [Строение и история..., 1996]. В системе почвенного районирования эта территория относится к Среднерусской провинции дерново-подзолистых среднегумусированных почв. [Добровольский, Урусеvская, 2004]. Автономные и трансэлювиальные позиции пологих склонов занимают дерново-средне- и слабоподзолистые почвы. На склонах и в днищах малых эрозионных форм сформировались дерновые и дерновые слабообразованные почвы; на конусах выноса эрозионных форм – дерновые среднечеткие почвы [Герасимова, Исаченкова, 2003].

Методика отбора почвенных проб и их физико-химическая характеристика приведены в работах [Глазovская, 2002; Самонova и др., 2016; Самонova и др., 2018], гранулометрические фракции выделены в соответствии с рекомендациями [Аринuшкина, 2013]. В Бронницкой геолого-геохимической экспедиции ФГУП «ИМГРЭ» элементный анализ выполнен атомно-эмиссионным спектральным методом просыпки в 3-фазной дуге (АЭС-ДР) на приборе ДФС- 458, только Zr – методом испарения из камерного электрода. Подготовка проб для АЭС-

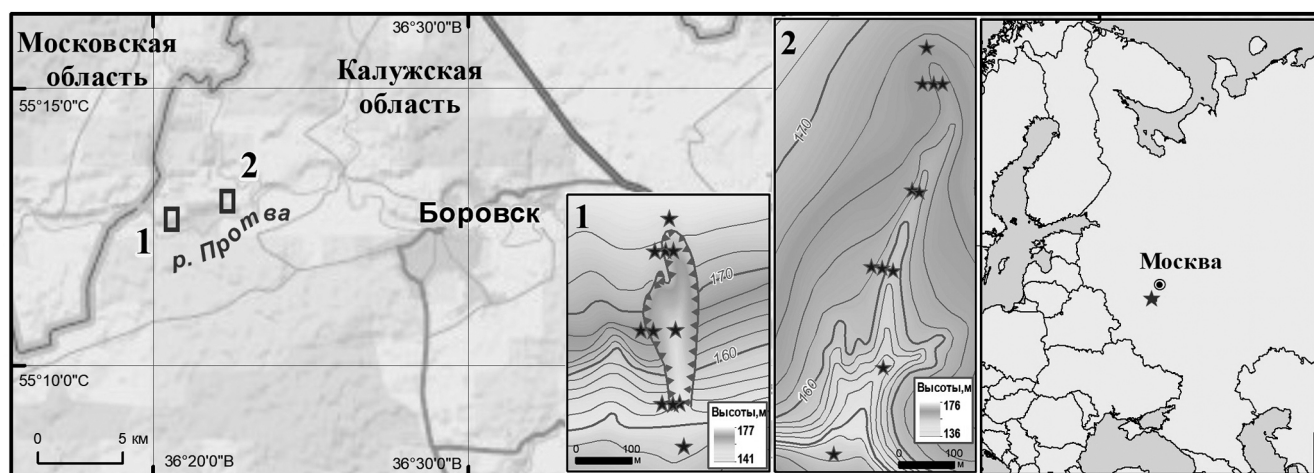


Рис. 1. Район исследования и места отбора проб: 1 – в овраге; 2 – в балке

Fig. 1. Study area and sampling locations: 1 – in a gully; 2 – in a balka

Таблица 1

Чувствительность определения элементов (пределы обнаружения), мг/кг

Метод	Fe	Mn	Ti	Zr	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
АЭС-ДР	10	30	30	10	5	3	5	5	30	4
ИСП-МС, ИСП-АЭС	1,4	0,12	0,4	0,056	0,11	0,0064	0,25	0,16	0,50	0,067

ДР-метода заключается в заполнении угольного тигля анализируемым материалом, который затем проходит стадию обжига при $t = 100^\circ\text{C}$.

Масс-спектральный с индуктивно связанной плазмой и атомно-эмиссионный спектральный с индуктивно-связанной плазмой анализы проб (ИСП)¹ по методике НСАМ №499-АЭС/МС на приборах Elan-6100 и Optima-4300 (Perkin Elmer, США) с предварительным разложением почвенного материала смесью кислот (HCl , HNO_3 , HF , HClO_4) выполнены в лаборатории ФГУП «ВИМС» (Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, Москва). Пределы обнаружения элементов разных методов приведены в табл. 1.

В каждой лаборатории проанализировано 22 пробы гумусовых горизонтов почв, 16 проб – фракции 1–0,25 мм, 21 проба – фракции 0,25–0,05 мм, по 22 пробы – фракции 0,05–0,01 и 0,01–0,001 мм, 19 проб – фракции <0,001 мм.

Исследования методики подготовки проб к анализу показывают, что величина погрешностей, воз-

никающих при переводе анализируемого материала из одного физического состояния в другое, зависит от минерального состава, свойств почв и форм нахождения в них элементов [Congiu et al., 2013]. В твердых пробах применение кислот в процессе их подготовки не обеспечивает полное разложение таких минералов, как хромшпинелиды, топаз, берилл, рутил, графит и, в некоторых случаях, циркон [Бычкова и др., 2016].

Для почвенной массы и ее гранулометрических фракций рассчитаны средние арифметические значения содержания металлов, коэффициенты вариации. Статистическая оценка значимости различий содержания металлов по данным различных методов (АЭС-ДР и ИСП) проведена с использованием двувыворочного t -теста Спирмена. За пороговое значение принят уровень значимости $\alpha = 0,05$.

Для исследования статистической зависимости результатов методов ИСП и АЭС-ДР применен регрессионный анализ. Предполагалось, что связь между сопряженными результатами двух методов можно выразить в виде функции $Y = f(X) + \varepsilon$, где $f(X)$ – некоторая детерминированная функция, учитывающая множество факторов, а ε – случайная величина. Основными задачами регрессионного анализа являлись установление формы зависимо-

¹ Концентрации Fe, Mn, Ti определялись атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой; Ni, Co, Cr, Zn, Pb – масс-спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой + атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой; Zr – масс-спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой.

сти Y от набора других переменных – X , определение вида уравнения регрессии, описывающего зависимость между переменными при корреляционном характере связи [Дмитриев, 1992]. Регрессионные модели были построены в широком диапазоне концентраций элементов; использовалась выборка, включающая пробы общей почвенной массы и отдельных гранулометрических фракций ($n = 122$). В качестве фактора X в регрессионном анализе использовались данные, полученные с помощью АЭС-ДР-анализа, а в качестве фактора Y (отклика) – данные ИСП-методов. Вся статистическая обработка данных проводилась в программе SPSS v. 13.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ содержания металлов по данным двух методов определения. Содержание большинства элементов в почвенной массе, полученное с помощью АЭС-ДР-метода, больше, чем определенное ИСП-методами (табл. 2, рис. 2, 3). По величине этого превышения элементы образуют следующий ряд (нижний индекс рядом с символом элемента показывает, во сколько раз оно больше): $Zr_{3,5} > Pb_{1,9} > Cu, Cr_{1,6} > Ti_{1,5} > Zn, Co_{1,3} > Ni_{1,2}$. Максимальное различие, значительно превышающее возможную ошибку определения, выявлено только для Zr , что связано с его нахождением преимущественно в составе устойчивого акцессорного минерала, такого как циркон [Sposito, 2008]. По данным [Potts et al., 2015; Zhang, Hu, 2019] для Zr при подготовке к ИСП-анализу требуются более жесткие условия разложения. Для остальных элементов характерно более активное участие в почвообразовательных процессах и присутствие в почвенной массе в составе вторичных глинистых минералов, а также оксидов и гидроксидов Fe и Mn , легче поддающихся разложению минеральными кислотами. Подготовка почвенной массы пробы для АЭС-ДР-метода проводится без предварительного кислотного разложения, что позволяет определять все формы нахождения элемента, за исключением легко переходящих в газообразную форму органических и части металлоорганических соединений, которые сгорают при обжиге угольного тигля при $t = 100^\circ C$. При подготовке проб с использованием смеси кислот (ИСП-методы), по-видимому, некоторые минеральные формы элементов не переходят в раствор, что в результате уменьшает содержание элемента. Содержание Mn на 10%, а Fe – на 30% больше по данным ИСП-метода, чем определенное АЭС-ДР-методом. Вероятно, для Mn эта ситуация может объясняться вхож-

ждением значительной его части в состав органических комплексов, образующих летучие соединения во время обжига графитовых тиглей, заполненных почвенным материалом. Различия результатов для Fe могут быть связаны с более низкой, чем для других элементов, точностью определения при АЭС-ДР-анализе. Статистическая оценка значимости различий содержания элементов в почвенной массе по данным двух методов приведена в табл. 3. Для всех элементов, кроме Mn , эти различия оказались значимы.

Содержание большинства элементов в почвенной массе, полученное с помощью АЭС-ДР-анализа, ближе к их кларку (см. табл. 2), чем результаты ИСП-методов.

Содержание элементов во фракции $1-0,25$ мм ($G1$), полученное АЭС-методом, больше для всех элементов, чем полученное методом ИСП (см. табл. 2, рис. 2, 3). По величине этого превышения элементы образуют ряд: $Zr_{3,5} > Ti_{2,1} > Zn_{2,0} > Cu_{1,9} > Pb_{1,7} > Cr_{1,6} > Co, Ni_{1,5} > Mn_{1,4} > Fe_{1,3}$. Максимальное различие, как и в почвенной массе, характерно для Zr , что, очевидно, связано с формой нахождения этого элемента преимущественно в составе устойчивых акцессорных минералов, в частности циркона. Различия содержания Ti , Zn и Cu , по данным двух методов, также указывают на значительную долю прочносвязанных форм элементов: Ti в почвах на территории исследования в песчаных фракциях часто присутствует в виде рутила [Комплексный..., 1992; Панин и др., 2009], а Zn , Cu , Pb и Cr – в акцессорных минералах в виде элементов-примесей, большинство которых сосредоточено в крупной фракции и не полностью разрушаются смесью кислот при подготовке проб для ИСП-методов [Бычкова и др., 2016; Zhang, Hu, 2019]. В данной фракции Fe и Mn присоединились к основной группе проанализированных элементов, вероятно, их содержание в составе первичных минералов максимально по сравнению с более тонкими фракциями, а содержание форм, связанных с органическим веществом, – минимально. В крупных песчаных фракциях Fe и Mn образуют гидроксидные пленки и агрегаты, легко разрушающиеся при подготовке проб, а также входят в состав кристаллических решеток тяжелых железистых минералов – роговой обманки, граната, ильменита и глауконита, которые часто встречаются в почвообразующих породах района исследования [Комплексный..., 1992].

В данной фракции статистически значимы различия среднего содержания для Zr , Ti , Zn , Pb , Cu , Cr , Ni ; для Fe , Mn , Co – они статистически не значимы (см. табл. 3).

Таблица 2
Среднее содержание элементов (I) в почвенной массе и в гранулометрических фракциях гумусовых горизонтов фоновых почв (мг/кг, Fe – в %) по данным ИСП(МС/АЭС)- и АЭС-ДР-методов и (II) различие полученных значений: отношение большего к меньшему содержанию

Элемент	Метод	Кларки литосферы ²	Кларки почв ³	Почвенная масса		Фракции почвы, мм											
						1–0,25		0,25–0,05		0,05–0,01		0,01–0,001		<0,001			
				I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Fe, %	ИСП	4,06	3,5	2,4	1,3*	4,6	1,3	4,7	1,0	1,7	1,1*	4,0	1,8*	9,5	1,5*		
	АЭС-ДР			1,8		6,0		4,8		1,5		2,2		6,2			
Mn	ИСП	770	488	927	1,1*	1923	1,4	398	1,1	238	1,3	671	1,0	3393	1,0		
	АЭС-ДР			835		2697		448		317		664		3323			
Cu	ИСП	27	38,9	17,7	1,6	41,6	1,9	41,0	1,3	35,2	1,4	175,3	1,1	177,1	1,0		
	АЭС-ДР			28,9		79,5		53,3		49,9		189,0		183,1			
Zn	ИСП	75	70	56,6	1,3	35,0	2,0	31,7	1,4	43,4	1,2	151,9	1,0	303,7	1,1*		
	АЭС-ДР			73,2		68,4		45,2		50,5		145,5		280,0			
Pb	ИСП	17	27	16,2	1,9	14,8	1,7	14,0	1,5	17,4	1,5	43,5	1,5	53,4	1,3		
	АЭС-ДР			31,1		24,6		21,3		26,0		64,3		70,2			
Co	ИСП	15	11,3	8,8	1,3	17,0	1,5	6,9	1,2	5,6	1,0	16,6	1,3*	29,7	1,1*		
	АЭС-ДР			11,5		26,1		8,4		5,5		12,6		27,7			
Ni	ИСП	50	29	21,7	1,2	27,4	1,5	29,1	1,0	15,9	1,3*	45,2	1,6*	90,2	1,4*		
	АЭС-ДР			26,2		41,7		29,5		11,8		28,4		64,1			
Cr	ИСП	92	59,5	38,6	1,6	31,3	1,6	38,0	1,4	20,7	2,7	52,3	1,2	118,6	1,3*		
	АЭС-ДР			62,3		50,5		52,9		56,9		61,2		89,9			
Zr	ИСП	170	267	156,4	3,5	40,0	3,5	115,8	4,0	199,0	4,4	142,1	3,6	103,3	1,9		
	АЭС-ДР			553,6		139,0		466,8		869,1		515,0		196,8			
Ti	ИСП	3900	7038	3314	1,5	714	2,1	2021	1,4	3136	1,7	4722	1,4	4619	1,0		
	АЭС-ДР			4832		1530		2800		5509		6418		4491			

Примечание. Звездочка рядом с цифрой, выделенной жирным шрифтом, показывает, что более высокое содержание элемента дают ИСП-методы, в остальных случаях более высокие средние концентрации определяются с помощью АЭС-ДР-метода.

² Кларки верхней континентальной коры: Fe, Mn, Ti, Cr, Ni, Zn, Pb (по Н.А. Григорьеву, 2009), Co, Cu (по Z. Hu, S. Gao, 2008), Zr (по А.П. Виноградову, 1962).

³ По данным А. Kabata-Pendias, 2011.

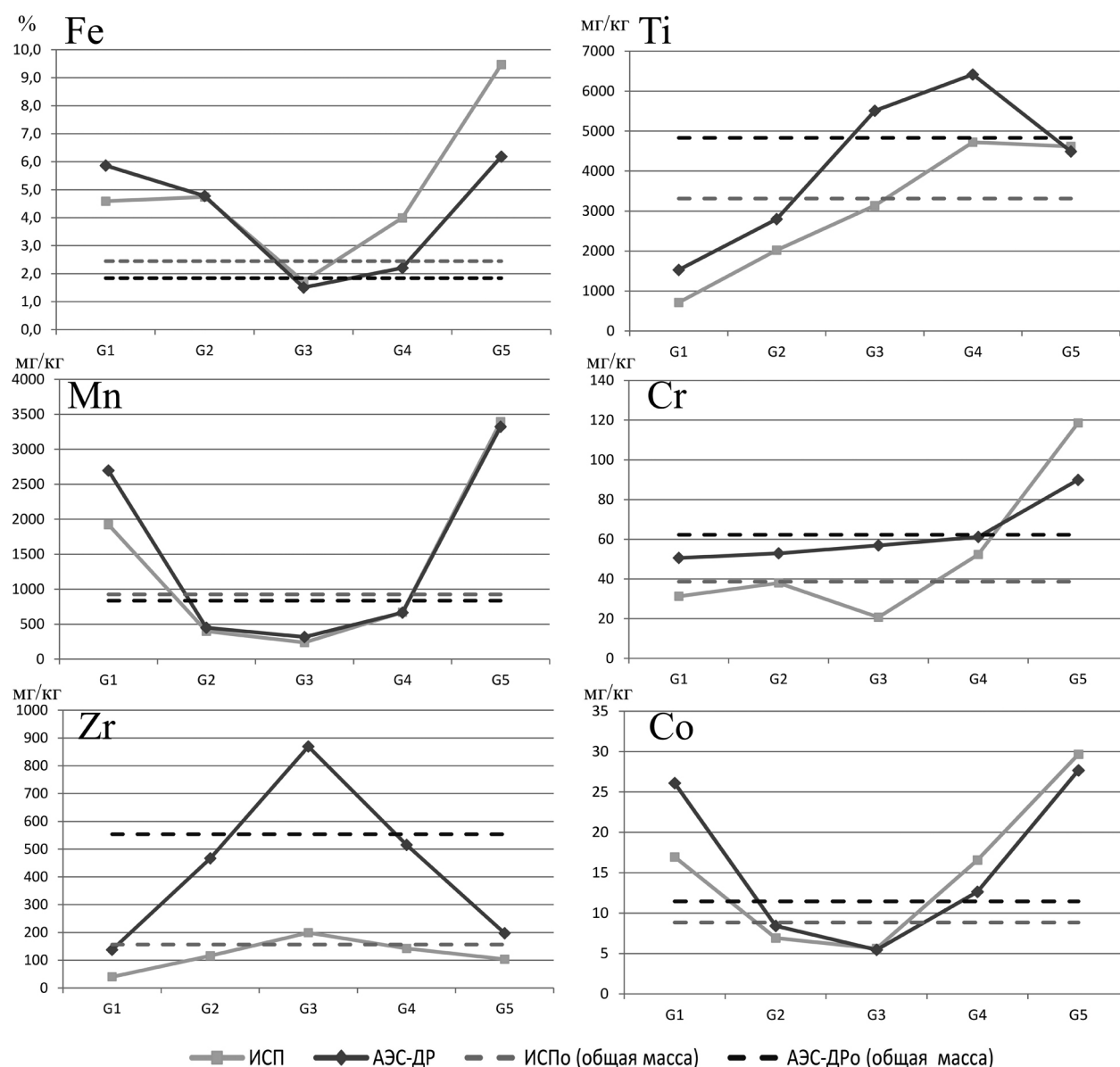


Рис. 2. Средние содержания Fe, Ti, Mn, Cr, Zr и Co в гранулометрических фракциях (сплошные линии) и в почвенной массе (пунктирные линии) гумусовых горизонтов почв по данным ИСП-АЭС/МС-методов и АЭС-ДР-метода.

Ось X – гранулометрические фракции: G1 – крупный и средний песок (1–0,25 мм); G2 – мелкий песок (0,25–0,05 мм);

G3 – крупная пыль (0,05–0,01 мм); G4 – средняя и мелкая пыль (0,01–0,001 мм); G5 – ил (<0,001 мм)

Fig. 2. Average concentrations of Fe, Ti, Mn, Cr, Zr, and Co in particle size fractions (solid lines) and in the bulk samples (dashed lines) of humus horizons according to ICP-AES/MS methods and DC-ARC-AES method.

X-axis – particle size fractions: G1 – coarse and medium sand (1–0,25 mm); G2 – fine sand (0,25–0,05 mm);

G3 – coarse silt (0,05–0,01 mm); G4 – medium and fine silt (0,01–0,001 mm); G5 – clay (<0,001 mm)

Во фракции 0,25–0,05 мм (G2) содержание элементов, полученных по результатам АЭС-ДР-анализа, больше: $Zr_{4,0} > Pb_{1,5} > Ti, Zn, Cr_{1,4} > Cu_{1,3} > Co_{1,2}$ (см. табл. 2, рис. 2, 3), по сравнению с данными ИСП-методов. Максимальное различие между методами в почвенной массе и во фракции G1 выявлено для Zr, причина этому описана выше; для Pb, Ti, Zn, Cr, Cu, Co – различия стали менее контрастными, о чем свидетельствуют цифры ря-

дом с элементами. Это, вероятно, обусловлено возрастанием доли форм элементов, извлекаемых смесью кислот. Содержание Fe и Ni в данной фракции не зависит от метода анализа, очевидно, формы содержания данных элементов полностью разрушаются смесью кислот, используемых при подготовке проб для ИСП-анализа. По данным ИСП-метода содержание Mn на 10% больше, чем определенное АЭС-ДР-методом, что повторяет результат для по-

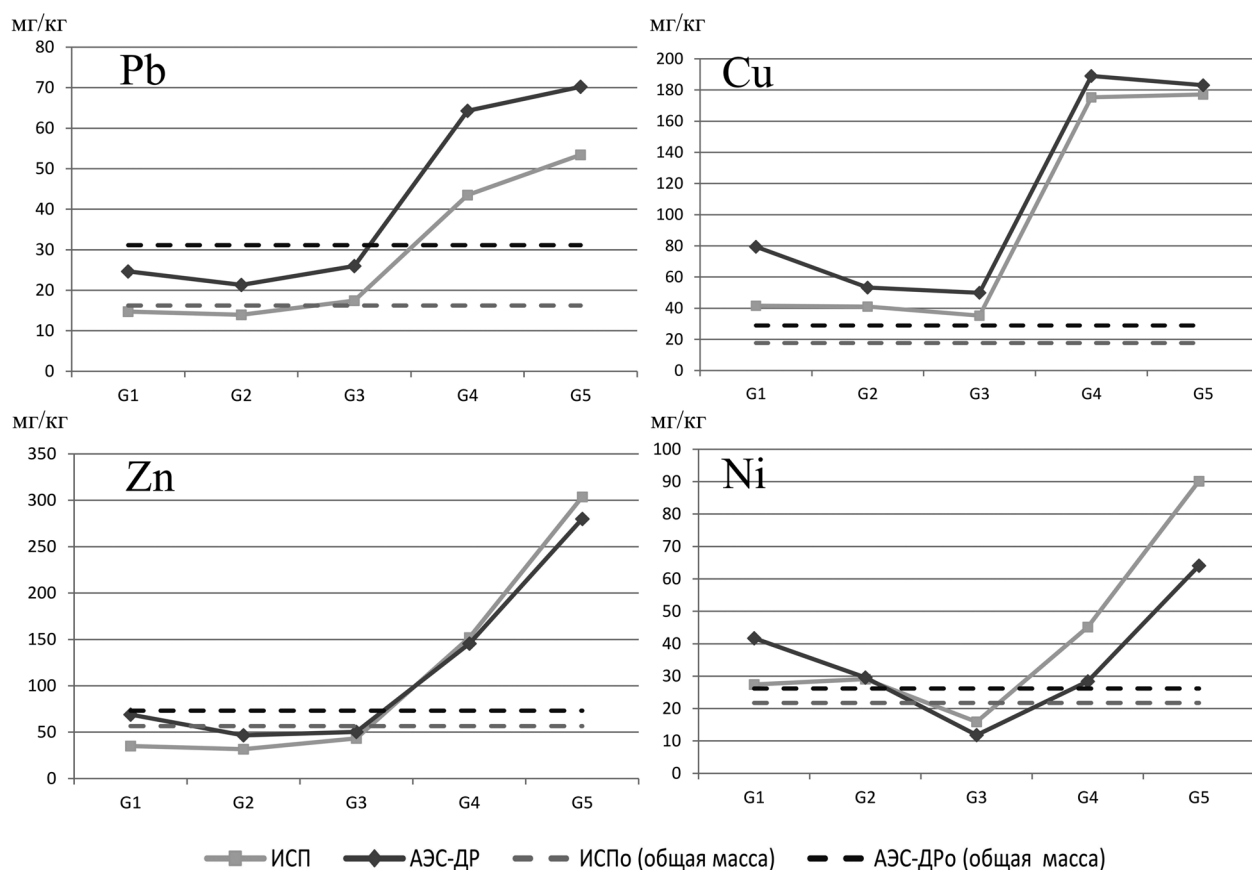


Рис. 3. Среднее содержание Zn, Ni, Cu и Pb в гранулометрических фракциях (сплошные линии) и в почвенной массе (пунктирные линии) гумусовых горизонтов по данным ИСП-АЭС/МС-методов и АЭС-ДР-метода.

Ось X – гранулометрические фракции: G1 – крупный и средний песок (1–0,25 мм); G2 – мелкий песок (0,25–0,05 мм); G3 – крупная пыль (0,05–0,01 мм); G4 – средняя и мелкая пыль (0,01–0,001 мм); G5 – ил (<0,001 мм)

Fig. 3. Average concentrations of Zn, Ni, Cu and Pb in particle size fractions (solid lines) and in the bulk samples (dashed lines) of humus horizons according to ICP-AES/MS methods and DC-ARC-AES method.

X-axis – particle size fractions: G1 – coarse and medium sand (1–0,25 mm); G2 – fine sand (0,25–0,05 mm); G3 – coarse silt (0,05–0,01 mm); G4 – medium and fine silt (0,01–0,001 mm); G5 – clay (<0,001 mm)

чвенной массы и может объясняться указанными выше причинами. Различия среднего содержания по данным двух методов во фракции мелкого песка статистически значимы только для Ti, Zr и Pb (см. табл. 3).

Во фракции 0,05–0,01 мм (G3) содержание элементов по результатам АЭС-ДР-анализа больше: $Zr_{4,4} > Cr_{2,7} > Ti_{1,7} > Pb_{1,5} > Cu_{1,4} > Mn_{1,3} > Zn_{1,2}$ (см. табл. 2, рис. 2, 3) по сравнению с данными ИСП-методов. Максимальное различие между методами также выявлено для Zr, но оно больше, чем в более крупных фракциях и почвенной массе; для Cr и Ti – этот показатель также увеличился, для Pb и Cu – остался на прежнем уровне, а для Zn – уменьшился по сравнению с фракцией мелкого песка (G2). Содержание Fe на 10%, а Ni – на 30% больше по данным ИСП-методов; это позволяет говорить о преобладании непрочно связанных форм данных элементов в крупной пыли и о значительном содер-

жании в их составе форм, связанных с органическим веществом, которые были «потеряны» в процессе АЭС-ДР-анализа. Содержание Mn по данным АЭС-ДР-анализа на 30% больше, чем по результатам ИСП-метода, что может быть связано как с формой его нахождения в этой фракции, так и со спецификой аналитических методов. Содержание Co, полученное разными методами, одинаковое. Во фракции G3 различия содержания по данным двух методов для Ti, Zr, Pb, Cr, Ni, Mn статистически значимы, а для Fe, Cu, Co и Zn – не значимы (см. табл. 3).

Содержание элементов во фракции 0,01–0,001 мм (G4) по результатам АЭС-ДР-анализа больше: $Zr_{3,6} > Pb_{1,5} > Ti_{1,4} > Cr_{1,2} > Cu_{1,1}$ (см. табл. 2, рис. 2, 3), по сравнению с данными ИСП-метода. Сохраняется максимальное различие между методами для Zr, менее контрастно оно проявляется для Ti, Cr, Cu и остается неизменным для Pb по сравнению с крупнопылевой фракцией. По данным

ИСП-анализа сравнительно с АЭС-ДР-методом больше содержание Fe, Ni, Co ($Fe_{1,8} > Ni_{1,6} > Co_{1,3}$). Возможно, в данной фракции возросло содержание форм этих элементов, связанных с органическим веществом, сгорающим в процессе проведения АЭС-ДР-анализа. Содержание Mn и Zn, полученное различными методами, одинаково. Во фракции G4 различия содержания по данным двух методов для Ti, Zr, Fe, Cr, Ni, Co, Pb статистически значимы; для Mn, Zn, Cu – не значимы (см. табл. 3).

Содержание элементов во фракции $<0,001$ мм (G5) по данным АЭС-ДР-анализа больше только для двух элементов: $Zr_{1,9}$ и $Pb_{1,3}$. Контрастность различия для Zr уменьшилась более чем в два раза по сравнению с более крупными фракциями из-за домини-

рования в илистой фракции вторичных глинистых минералов [Hardy, Cornu, 2006]. Содержание следующих элементов по данным ИСП-метода больше, чем по результатам АЭС-ДР-анализа: $Fe_{1,5} > Ni_{1,4} > Cr_{1,3} > Zn, Co_{1,1}$. Известно [Пляскина, Ладонин, 2005], что к илистой фракции приурочено максимальное содержание органического вещества и связанных с ним соединений элементов, значительная часть которых при обжиге пробы для АЭС-ДР-анализа сгорает, что и обуславливает потери части их валового содержания. Содержание Mn, Ti и Cu, полученное различными методами, одинаково. Различия содержания во фракции G5 по данным двух методов для Zr, Fe, Cr, Ni, Pb статистически значимы; для Mn, Cu, Zn, Co, Ti – не значимы (см. табл. 3).

Таблица 3

Достоверность различий среднего содержания элементов в гранулометрических фракциях и в почвенной массе гумусовых горизонтов фоновых почв по данным ИСП(МС/АЭС)- и АЭС-ДР-методов, по результатам *t*-теста Стьюдента для двух независимых выборок

Элемент	Гранулометрические фракции, мм					Почвенная масса
	G1 1–0,25	G2 0,25–0,05	G3 0,05–0,01	G4 0,01–0,001	G5 <0,001	
Cu	0,009*	0,241	0,133	0,747	0,850	<0,001*
Zn	0,001*	0,080	0,191	0,690	0,354	<0,001*
Pb	0,001*	0,002*	<0,001*	0,009*	0,001*	<0,001*
Co	0,076	0,260	0,744	0,006*	0,285	<0,001*
Ni	0,042*	0,930	0,008*	<0,001*	<0,001*	<0,001*
Cr	0,024*	0,114	<0,001*	0,003*	<0,001*	<0,001*
Mn	0,284	0,342	0,007*	0,926	0,876	0,481
Fe	0,179	0,965	0,530	0,005*	<0,001*	<0,001*
Ti	0,002*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	0,458*	<0,001*
Zr	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*

Примечание. *Значение уровня значимости p ниже порогового (0,05), показывающее высокую статистическую достоверность различий среднего для двух выборок.

Регрессионный анализ. Использовалась линейная регрессия, величина коэффициентов детерминации позволила ранжировать элементы по качеству полученных регрессионных прямых следующим образом: Cu, Mn, Zn ($R^2 \sim 0,9$, табл. 4) > Co, Ni ($R^2 = 0,78–0,76$) > Pb ($R^2 = 0,73$) > Zr, Ti, Cr ($R^2 \sim 0,67–0,62$) > Fe ($R^2 = 0,58$). В соответствии с этим рядом, качество линейной формы связи и, следовательно, сопряженность двух методов оказались наименьшими для Fe, что может быть обусловлено разной точностью методов его определения (значительно более низкой при применении АЭС-ДР). Для элементов, часто встречающихся в устойчивых первичных минералах – Zr, Ti, Cr, а также для Co, Ni и Pb получены

достаточно высокие коэффициенты детерминации (см. табл. 4), свидетельствующие о том, что между исследуемыми методами существует закономерное соотношение. Наилучшие показатели линейности связи выявлены для Cu, Mn, Zn (рис. 4).

Коэффициенты линейной регрессии a и b , полученные на основе метода наименьших квадратов, приведены в табл. 4. Пользуясь уравнением регрессии можно прогнозировать концентрацию, определяемую методами ИСП при заданном содержании элемента, полученным методом АЭС-ДР. Величины углового коэффициента (b), которые позволяют оценить интенсивность и направление влияния X на результирующую переменную Y , варьиро-

вали от 0,16 (Zr) до 1,31 (Cr). Большое отличие b от 1, полученное для Pb ($b = 0,567$), Ti ($b = 0,639$) и особенно Zr ($b = 0,160$), свидетельствует о том, что регрессионные уравнения дают более низкое содержание для ИСП-метода по сравнению с данными метода АЭС-ДР, особенно в случае с Zr (см. рис. 4). Исключением являются ситуации, когда со-

держание перечисленных элементов, определенное АЭС-ДР-методом, находится в области пределов обнаружения. Наименьшее расхождение между двумя методами по содержанию (согласно коэффициентам регрессии) получены для Cu и Mn (отчасти Zn), у которых угловой коэффициент близок к 1 (см. табл. 4, рис. 4).

Таблица 4

Результаты регрессионного анализа

Элемент	Коэффициент детерминации R^2	Уравнение регрессии*	
		Константа a	Коэффициент регрессии b
Fe	0,578	0,866	1,033
Mn	0,903	54,91	0,914
Cu	0,937	-3,19	0,932
Zn	0,894	-11,58	1,076
Pb	0,736	4,30	0,567
Co	0,783	2,171	0,818
Ni	0,763	-0,765	1,243
Cr	0,622	-30,65	1,314
Zr	0,671	54,86	0,160
Ti	0,641	357	0,639

Примечание. *Уравнение вида $Y = a + bX$, где X – данные спектрального анализа, а фактор Y – результирующие величины ИСП-методов.

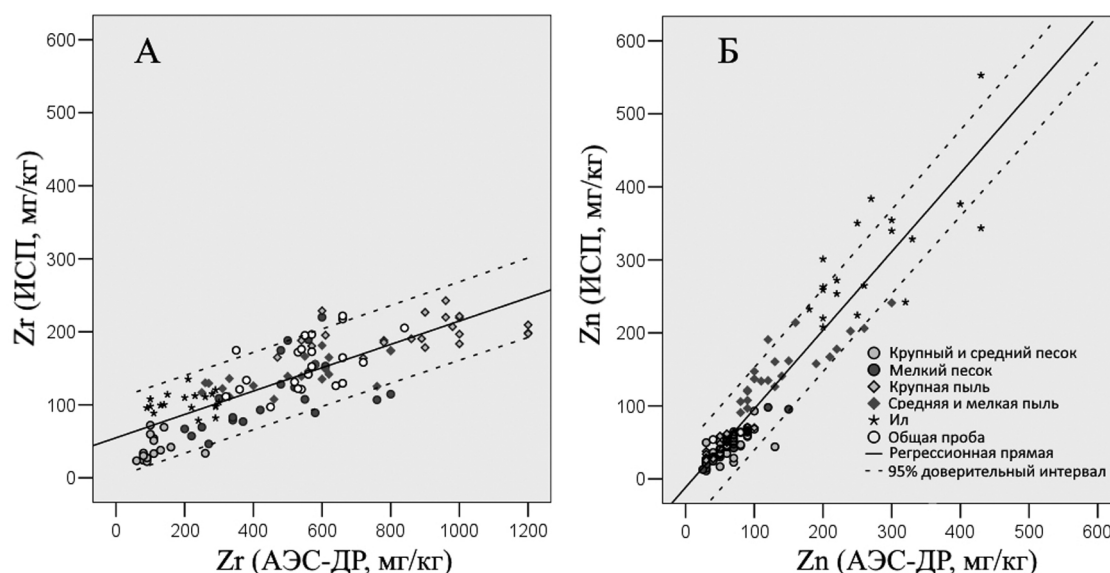


Рис. 4. Диаграммы рассеяния для концентраций Zr (А) и Zn (Б), показывающие связь данных, полученных ИСП-методами (ось Y) и АЭС-ДР-методом (ось X).

Для построения диаграмм использовались выборки из 122 проб, которые включали общие пробы и пробы отдельных гранулометрических фракций. Коэффициент детерминации регрессионной модели для Zr $R^2 = 0,671$, для Zn $R^2 = 0,894$; коэффициенты регрессии $b = 1,076$ и $0,160$, соответственно

Fig. 4. Scatter diagrams of Zr (A) and Zn (Б) concentrations showing the relationship between the data obtained by ICP methods (Y-axis) and DC-ARC-AES method (X-axis) with regression lines and a confidence corridor.

Data on 122 samples were used for the graphs, including bulk soil samples and samples of individual particle size fractions. Determination coefficients of the regression model are $R^2 = 0,671$ for Zr, and $R^2 = 0,894$ for Zn; regression coefficients are $b = 1,076$ and $0,160$, respectively

Оценка адекватности линейной модели исходным данным проведена на основе изучения величин остатков регрессии. Анализ графического представления остатков указывает на факт непостоянства дисперсии, что связано, по-видимому, с зависимостью точности методов от диапазона определяемых концентраций. Гетероскедастичность⁴ ограничивает применение полученных уравнений в связи с неодинаковой воспроизводимостью концентраций при анализе разных фракций.

Сравнительный анализ гранулометрического фракционирования металлов по результатам двух методов анализа. По результатам обоих аналитических методов максимальное содержание Fe, Mn, Ni, Co, Cr, Zn, Pb (см. рис. 2, 3) выявлено в илистой фракции (G5), Ti – во фракции средней и тонкой пыли (G4), Zr концентрируется во фракции крупной пыли (G3). Различие между аналитическими методами выявлено лишь для Cu, максимальное содержание которой по данным ИСП-анализа приурочено к илистой фракции (G5), а по данным АЭС-ДР-метода – к средней и тонкой пыли (G4); однако отличие от илистой фракции в последнем случае составляет лишь 6,7%. Данные обоих методов анализа выявили минимальное содержание Fe, Mn, Ni, Co, Cu во фракции крупной пыли (G3), Zn и Pb – в мелкопесчаной фракции (G2), Ti и Zr – во фракции крупного и среднего песка (G1). Метод анализа повлиял на распределение по гранулометрическим фракциям Cr, его минимальное содержание по данным ИСП методов обнаружено в крупной пыли (G3), а по результатам АЭС-ДР-метода – во фракции крупного и среднего песка (G1), причем содержание во фракции G1 в 1,5 раза больше, чем во фракции G3. Убывание содержания в ряду фракций $G5 > G4 > G3 > G2 > G1$ наблюдается (с некоторым допущением) только для Ti –

по данным ИСП-анализа и для Cr – по результатам АЭС-ДР-анализа.

ВЫВОДЫ

Различия среднего содержания по данным АЭС-ДР- и ИСП-методов статистически значимы: в почвенной массе – для Fe, Ti, Zr, Ni, Co, Cu, Cr, Zn, Pb; во фракции G1 – для Ti, Zr, Zn, Pb, Cu, Cr, Ni; во фракции G2 – для Ti, Zr, Pb; во фракции G3 – для Ti, Zr, Pb, Cr, Ni, Mn; во фракции G4 – для Ti, Zr, Fe, Cr, Ni, Co, Pb; во фракции G5 – для Zr, Fe, Cr, Ni, Pb. Метод анализа не повлиял на содержание Fe и Ni во фракции G2, Co – во фракции G3, Mn и Zn – во фракции G4, Mn, Ti и Cu – во фракции G5.

В крупных гранулометрических фракциях метод АЭС-ДР показывает более высокое содержание элементов, чем ИСП-методы, что обусловлено преобладанием в них минеральных форм соединений. В илистой фракции, где содержание вторичных глинистых минералов и подвижных форм элементов максимально, результаты ИСП-анализа слабо превышают данные АЭС-ДР-метода или не отличаются от него.

Регрессионный анализ показал линейную корреляцию двух методов определения содержания элементов в широком диапазоне их концентраций. Наименьшее качество регрессионной прямой выявлено для Fe, а наибольшее – для Cu, Mn и Zn. Использование полученных уравнений ограничено непостоянством дисперсии случайной ошибки регрессионной модели.

По данным обоих методов распределение содержания по гранулометрическим фракциям совпадает для Zr, Mn, Co, Pb; для Fe, Ti, Ni, Zn различия выражаются в последовательности двух фракций внутри интервала: максимальное – минимальное содержание. Максимальное влияние метод анализа оказал на гранулометрическое фракционирование Cr.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 19-77-30004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
- Бычкова Я.В., Синицын М.Ю., Петренко Д.Б., Николаева И.Ю., Бугаев И.А., Бычков А.Ю. Методические особенности многоэлементного анализа горных пород методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2016. № 6. С. 56–63. DOI: 10.33623/0579-9406-2016-6-56-63.
- Васильева И.Е., Шабанова Е.В. Определение микроэлементов в растениях методом дуговой атомно-эмиссионной спектрометрии // Аналитика и контроль. 2019. Т. 23. № 3. С. 298–313. DOI: 10.15826/analitika.2019.23.3.011.
- Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- Власов Д.В., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. Геохимия дорожной пыли (Восточный округ г. Москвы) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 1. С. 23–33.

⁴ Гетероскедастичность – неоднородность наблюдений, которая выражается в неодинаковой (непостоянной) дисперсии случайной ошибки регрессионной модели.

- Герасимова М.И., Исаченкова Л.Б. Почвы и почвенный покров Сатинского учебного полигона. М.: Полиграф. отдел географического ф-та МГУ, 2003. 39 с.
- Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследования природных ландшафтов. 2-е изд. Смоленск: Ойкумена, 2002. 288 с.
- Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.
- Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. М.: Изд-во МГУ, 2004. 460 с.
- Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Книжный дом Либроком, 2009. 327 с.
- Зырин Н.Г., Обухов А.И. Спектральный анализ почв, растений и других биологических объектов. М.: Изд-во МГУ, 1977. 333 с.
- Комплексный анализ четвертичных отложений Сатинского учебного полигона / под ред. Г.И. Рычагова и С.И. Антонова. М.: Изд-во МГУ, 1992. 51 с.
- Микроэлементы в почвах Советского Союза / под ред. В.А. Ковды, Н.Г. Зырина. М.: Изд-во МГУ, 1973. 281 с.
- Панин А.В., Каревская И.А., Фузеина Ю.Н., Шереметьская Е.Д. Среднеголоценовая фаза оврагообразования в юго-западном Подмоскowie // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 6. С. 60–70.
- Пляскина О.В., Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в гранулометрических фракциях некоторых типов почв // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2005. № 4. С. 36–43.
- Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Самонова О.А., Асеева Е.Н., Касимов Н.С. Металлы в гранулометрических фракциях почв овражной системы (юго-восточная часть Смоленско-Московской возвышенности) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 3. С. 18–28.
- Самонова О.А., Касимов Н.С., Асеева Е.Н. Распределение металлов по гранулометрическим фракциям в балочной системе (юго-восточная часть Смоленско-Московской возвышенности) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2018. № 6. С. 34–46.
- Строение и история развития долины р. Протвы / С.И. Антонов, Г.И. Рычагов. М.: Изд-во МГУ, 1996. 127 с.
- Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах / под ред. Н.Г. Зырина, Л.К. Садовникова. М.: Изд-во МГУ, 1985. 209 с.
- Ajmone-Marsan F., Biasioli M., Kralj T., Grčman H., Davidson C.M., Hursthouse A.S., Madrid L., Rodrigues S. Metals in particle-size fractions of the soils of five European cities, *Environmental Pollution*, 2008, vol. 152, p. 73–81, DOI: 10.1016/j.envpol.2007.05.020.
- Amorosi A., Sammartino I. Assessing natural contents of hazardous metals in soils by different analytical methods and its impact on environmental legislative measures, *Int. J. Environment and pollution*, 2011, no. 46, p. 164–177.
- Congiu A., Perucchini S., Cesti P. Trace metal contaminants in sediments and soils: comparison between ICP and XRF quantitative determination, *E3S Web of Conferences*, 2013, no. 1, DOI: 10.1051/e3sconf/20130109004.
- Hardy M., Cornu S. Location of natural trace elements in silty soils using particle-size fractionation, *Geoderma*, 2006, vol. 133, p. 295–308.
- Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update, *Chemical Geology*, 2008, vol. 253, iss. 3–4, p. 205–221.
- Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*, 4th ed., London, New York, CRC Press, Boca Raton, 2011, 548 p.
- Kim H.-R., Kim K.-H., Yu S., Moniruzzaman M., Hwang S.-I., Lee G.-T., Yun S.-T. Better assessment of the distribution of As and Pb in soils in a former smelting area, using ordinary co-kriging and sequential Gaussian co-simulation of portable X-ray fluorescence (PXRF) and ICP-AES data, *Geoderma*, 2019, vol. 341, p. 26–38, DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.01.031.
- Potts P.J., Webb P.C., Thompson M. Bias in the determination of Zr, Y and rare earth element concentrations in selected silicate rocks by ICP-MS when using some routine acid dissolution procedures: evidence from the GeoPT proficiency testing programme, *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2015, vol. 39(3), p. 315–327, DOI: 10.1111/j.1751-908X.2014.00305.x.
- Sposito G. *The chemistry of soils*, 2nd ed., New York, USA, Oxford University Press, 2008, 328 p.
- Zhang W., Hu Z. Recent advances in sample preparation methods for elemental and isotopic analysis of geological samples, *Spectrochimica Acta Part B, Atomic Spectroscopy*, 2019, vol. 160, 105690, DOI: 10.1016/j.sab.2019.105690.
- Zhang J., Wu L., Zhang Y., Li F., Fang X., Mao H. Elemental composition and risk assessment of heavy metals in the PM10 fractions of road dust and roadside soil, *Particulology*, 2019, no. 44, p. 146–152, DOI: 10.1016/j.partic.2018.09.003.

Поступила в редакцию 21.08.2021

После доработки 15.02.2022

Принята к публикации 09.03.2022

COMPARISON OF RESULTS OBTAINED THROUGH THE ANALYSIS OF CHEMICAL ELEMENTS IN BACKGROUND FOREST SOILS BY DIFFERENT SPECTROSCOPY METHODS

E.N. Aseyeva¹, O.A. Samonova²

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography

¹ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: aseyeva@mail.ru

² Ph.D. in Geography; e-mail: oasamonova@mail.ru

The contents of Fe, Mn, Ti, Zr, Ni, Co, Cr, Zn, Pb in soil bulk samples and in five particle size fractions (1–0,25, 0,25–0,05, 0,05–0,01, 0,01–0,001, <0,001 mm) separated from the humus horizons of soils characteristic of the southeastern part of the Smolensk – Moscow Upland were studied. Two methods, namely quantitative direct current arc atomic emission spectroscopy (DC-ARC-AES method) and ICP-AES/ICP-MS (ICP methods) were employed to assess concentrations of the elements in soddy soils of the sides and bottoms of two small erosional landforms and in loamy sod-podzolic soils on cover and deluvial loams. The analysis of bulk samples using ICP methods revealed higher concentrations relative to the results of DC-ARC-AES method for Mn in the 0,25–0,05 mm particle size fraction, Fe and Ni in the 0,05–0,01 mm particle size fraction, Fe, Ni, Co in the 0,01–0,001 mm particle size fraction; Fe, Ni, Cr, Zn, Co in the fraction with particle sizes <0,001 mm. The analytic method did not impact the results for Fe and Ni in the 0,25–0,05 mm particle size fraction, Co in the 0,05–0,01 mm fraction, Mn and Zn in the 0,01–0,001 mm particle size fraction, Mn, Ti and Cu in the <0,001 mm particle size fraction. The DC-ARC-AES method revealed higher concentrations of elements in the coarse particle size fraction than those determined by ICP, because the fraction is dominated by mineral phases of the studied metals. The results obtained by the ICP methods for the clay fraction with the maximum content of mobile phases of elements slightly exceed those of the DC-ARC-AES analysis or show nearly equal concentrations. The regression analysis revealed a correlation between DC-ARC-AES and ICP methods if the entire range of concentrations is considered. Application of the equations for the predictive modeling of element concentrations could be limited because the residuals of the regression models do not have constant variance. According to the results obtained by two methods, the distribution of elements across the particle size fractions completely coincides for Mn, Co, Pb, Zr and Cu and is similar for Zn, Fe, Ti and Ni, i.e. the maximum and minimum concentrations of these elements were found in the same particle size fractions. Method of analysis had the maximum impact on the partitioning of Cr among particle size fractions.

Keywords: total concentrations of metals, Retisols, particle size fractions, DC-ARC-AES and ICP-AES/ICP-MS methods of analysis

Acknowledgements. This study was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-77-30004).

REFERENCES

- Ajmone-Marsan F., Biasioli M., Kralj T., Grčman H., Davidson C.M., Hursthouse A.S., Madrid L., Rodrigues S. Metals in particle-size fractions of the soils of five European cities, *Environmental Pollution*, 2008, vol. 152, p. 73–81, DOI: 10.1016/j.envpol.2007.05.020.
- Amorosi A., Sammartino I. Assessing natural contents of hazardous metals in soils by different analytical methods and its impact on environmental legislative measures, *Int. J. Environment and pollution*, 2011, no. 46, p. 164–177.
- Arinushkina E.V. *Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv* [Guidelines for soil chemical analysis], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1970, 487 p. (In Russian)
- Bychkova Ja.V., Sinicyn M.Ju., Petrenko D.B. et al. Metodicheskie osobennosti mnogojelementnogo analiza gornyh porod metodom mass-spektrometrii s induktivno svjazannoj plazmoj [Methodological features of multi-element analysis of rocks by inductively coupled plasma mass spectrometry], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 4, Geologija*, 2016, no. 6, p. 56–63, DOI: 10.33623/0579-9406-2016-6-56-63. (In Russian)
- Congiu A., Perucchini S., Cesti P. Trace metal contaminants in sediments and soils: comparison between ICP and XRF quantitative determination, *E3S Web of Conferences*, 2013, no. 1, DOI: 10.1051/e3sconf/20130109004.
- Dmitriev E.A. *Matematicheskaja statistika v pochvovedenii* [Mathematical statistics in soil science], Moscow, Knizhnyj dom Librokom Publ., 2009, 327 p. (In Russian)
- Dobrovol'skij G.V., Urusevskaja I.S. *Geografija pochv* [Geography of soils], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2004, 460 p. (In Russian)
- Gerasimova M.I., Isachenkova L.B. *Pochvy i pochvennyj pokrov Satinskogo uchebnogo poligona* [Soils and soil cover of the Satino training station], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2003, 39 p. (In Russian)
- Glazovskaja M.A. *Geohimicheskie osnovy tipologii i metodiki issledovanija prirodnih landshaftov* [Geochemical foundations of typology and methods for the study of natural landscapes], Smolensk, Ojkumena Publ., 2002, 288 p. (In Russian)

- Grigor'ev N.A. *Raspredelenie himicheskikh elementov v verhnej chasti kontinental'noj kory* [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust], Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2009, 382 p. (In Russian)
- Hardy M., Cornu S. Location of natural trace elements in silty soils using particle-size fractionation, *Geoderma*, 2006, vol. 133, p. 295–308.
- Himija tyazhelyh metallov, mysh'jaka i molibdena v pochvah [Chemistry of heavy metals, arsenic and molybdenum in soils], N.G. Zyrin, L.K. Sadovnikov (eds.), Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1985, 209 p. (In Russian)
- Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update, *Chemical Geology*, 2008, vol. 253, iss. 3–4, p. 205–221.
- Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*, 4th ed., London, New York, CRC Press, Boca Raton, 2011, 548 p.
- Kim H.-R., Kim K.-H., Yu S., Moniruzzaman M., Hwang S.-I., Lee G.-T., Yun S.-T. Better assessment of the distribution of As and Pb in soils in a former smelting area, using ordinary co-kriging and sequential Gaussian co-simulation of portable X-ray fluorescence (PXRF) and ICP-AES data, *Geoderma*, 2019, vol. 341, 2019, p. 26–38, DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.01.031.
- Kompleksnyj analiz chetvertichnyh otlozhenij Satinskogo uchebnogo poligona [Comprehensive analysis of Quaternary deposits of the Satino training station], G.I. Rychagov, S.I. Antonov (eds.), Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1992, 51 p. (In Russian)
- Mikrojelementy v pochvah Sovetskogo Sojuza [Trace elements in the soils of the Soviet Union], V.A. Kovda, N.G. Zyrin (eds.), Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1973, 281 p. (In Russian)
- Panin A.V., Karevskaja I.A., Fuzeina Ju.N., Sheremeckaja E.D. *Srednegolocenovaja faza ovragoobrazovaniya v jugo-zapadnom Podmoskov'e* [The Middle Holocene phase of gully formation in the southwestern Moscow region], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2009, no. 6, p. 60–70. (In Russian)
- Pljaskina O.V., Ladonin D.V. Soedineniya tjazhelyh metallov v granulometricheskikh frakcijah nekotoryh tipov pochv [Compounds of heavy metals in particle size fractions of some soil types], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2005, no. 4, p. 36–43. (In Russian)
- Potts P.J., Webb P.C., Thompson M. Bias in the determination of Zr, Y and rare earth element concentrations in selected silicate rocks by ICP-MS when using some routine acid dissolution procedures: evidence from the GeoPT proficiency testing programme, *Geostandards and Geo-analytical Research*, 2015, vol. 39(3), p. 315–327, DOI: 10.1111/j.1751-908X.2014.00305.x.
- Saet Ju.E., Revich B.A., Janin E.P. *Geohimija okruzhajushhej sredy* [Geochemistry of the environment], Moscow, Nedra Publ., 1990, 335 p. (In Russian)
- Samonova O.A., Aseeva E.N., Kasimov N.S. Metally v granulometricheskikh frakcijah pochv ovrazhnoj sistemy (jugo-vostochnaja chast' Smolensko-Moskovskoj vozvyshehnosti) [Grain-size distribution of metals in soils of a gully system (southeastern part of the Smolensk-Moscow Upland)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 3, p. 18–28. (In Russian)
- Samonova O.A., Kasimov N.S., Aseeva E.N. Raspredelenie metallov po granulometricheskim frakcijam v balochnoj sisteme (jugo-vostochnaja chast' Smolensko-Moskovskoj vozvyshehnosti) [Distribution of metals in granulometric fractions of a balka soil-geochemical system (south-eastern part of the Smolensk-Moscow Upland)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, no. 6, p. 34–46. (In Russian)
- Sposito G. *The chemistry of soils*, 2nd ed., New York, USA, Oxford University Press, 2008, p. 328.
- Stroenie i istorija razvitiya doliny r. Protvy [Structure and history of the evolution of the Protva river valley], S.I. Antonov, G.I. Rychagov (eds.), Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1996, 127 p. (In Russian)
- Vasil'eva I.E., Shabanova E.V. Opredelenie mikrojelementov v rastenijah metodom dugovoj atomno-emissionnoj spektrometrii [Determination of trace elements in plants by arc atomic emission spectrometry], *Analitika i kontrol*, 2019, vol. 23, no. 3, p. 298–313, DOI: 10.15826/analitika.2019.23.3.011. (In Russian)
- Vinogradov A.P. Srednee sodержание himicheskikh jelementov v glavnyh tipah izverzhennyh porod zemnoj kory [Abundances of chemical elements in main types of igneous rocks of the earth's crust], *Geohimija*, 1962, no. 7, p. 555–571. (In Russian)
- Vlasov D.V., Kasimov N.S., Kosheleva N.E. Geohimija dorozhnoj pyli (Vostochnyj okrug g. Moskvy) [Geochemistry of road dust (Eastern District of Moscow)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2015, no. 1, p. 23–33. (In Russian)
- Zhang J., Wu L., Zhang Y., Li F., Fang X. and Mao H. Elemental composition and risk assessment of heavy metals in the PM10 fractions of road dust and roadside soil, *Particuology*, 2019, no. 44, p. 146–152, DOI: 10.1016/j.partic.2018.09.003.
- Zhang W., Hu Z. Recent advances in sample preparation methods for elemental and isotopic analysis of geological samples, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2019, vol. 160, 105690, DOI: 10.1016/j.sab.2019.105690.
- Zyrin N.G., Obuhov A.I. *Spektral'nyj analiz pochv, rastenij i drugih biologicheskikh ob'ektov* [Spectral analysis of soils, plants and other biological objects], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1977, 333 p. (In Russian)

Received 21.08.2021

Revised 15.02.2022

Accepted 09.03.2022

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ МЕНТАЛЬНОГО ТУРИСТСКО-РЕКРЕАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА ПО ОТЗЫВАМ ТУРИСТОВ (НА ПРИМЕРЕ КИРОВСКОЙ ОБЛАСТИ)

Е.В. Конышев

*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
и.о. зав. кафедрой социально-экономической географии;
Вятский государственный университет, кафедра туризма и управления персоналом,
доц., канд. геогр. наук; e-mail: konj@bk.ru*

В современном мире одним из ключевых критериев эффективности организации отдыха и туризма становятся впечатления. На формирование впечатлений направлены усилия организаций туристско-рекреационного комплекса, выстраиваются сценарии туристских продуктов, туристы делятся впечатлениями в сети Интернет. Повышается актуальность изучения ментального туристско-рекреационного пространства с помощью новых методов цифрового анализа. Для оценки ментального туристско-рекреационного пространства целесообразно использовать метод текстового анализа, так как в отзывах туристов содержится фиксация эмоционального состояния, впечатления от взаимодействия с реальным компонентом туристско-рекреационного пространства. В статье представлен аналитический обзор научных подходов к изучению ментального туристско-рекреационного пространства, применения методов его оценки, анализа цифровых следов туристов, опыт применения текстового анализа к изучению отзывов туристов. Информационная база исследования формировалась из отзывов туристов и рекреантов с платформы Tripadvisor. Обработка базы отзывов и текстовый анализ осуществлялся с помощью программы PolyAnalyst. База данных состояла из 6300 отзывов. Осуществлялся расчет индекса тональности, извлечение ключевых слов и определялась связь терминов для определения ключевых атрибутов ментального туристско-рекреационного пространства. Проводился покомпонентный анализ индекса тональности и анализ его изменения с 2013 по 2021 г. Дополнительно был проведен географический анализ с выявлением территориальных особенностей восприятия туристско-рекреационного пространства городов Кировской области. Сделаны выводы о негативном восприятии транспортной инфраструктуры, природных объектов и рекреационных зон, благоустройства территории населенных пунктов Кировской области. Отмечено повышение доли негативных отзывов со временем. Результаты исследования могут быть использованы для устранения проблемных зон взаимодействия населения с компонентами реального туристско-рекреационного пространства и корректировки региональной туристской политики. Предложенная методика может быть применима для оценки ментального туристского пространства других регионов России и мира.

Ключевые слова: PolyAnalyst, Tripadvisor, текстовый анализ, индекс тональности

ВВЕДЕНИЕ

Рекреационная география является одной из самых молодых в семье общественно-географических наук. Во многом именно этим объясняется то, что понятийно-категориальный аппарат рекреационной географии еще не сформировался. Продолжаются дискуссии и по содержанию объекта и предмета науки. Возникнув на стыке нескольких отраслей географии и других наук, рекреационная география изначально была «обречена» на междисциплинарность и комплексность. Неопределенности в объектно-предметную сущность рекреационной географии добавил переход на рыночные отношения в экономике, массовые заимствования туристской терминологии из зарубежных научных концепций [Поросенков, Худякова, 2009]. Объектом изучения рекреационной географии изначально было выбрано рекреационное пространство. В последующем,

в связи с выделением туризма в отдельную отрасль экономики, повышением его значимости среди других видов рекреационной деятельности, многие авторы стали применять термин «туристско-рекреационное пространство». Однако следует отметить, что в научной среде понятие «туристско-рекреационное пространство» окончательно не сформировано. В зависимости от методологического подхода авторы вкладывают в понятие экономическое [Тарасенок, 2010], социологическое [Дусенко, 2014], культурологическое [Замятин, 2010], географическое [Мажар, 2014] содержание, применяя для исследования сложившиеся в данных науках подходы и методы.

В общественной географии туристско-рекреационное пространство является частью географического пространства, которое развивается в соответствии с системой общественно-географических

законов и закономерностей [Шарыгин, Конышев, 2018]. Пермские географы к числу ведущих законов, которые определяют развитие общественно-географического пространства, относят антропогенный закон, закон усложнения географической материи, закон трансформации территориального потенциала в региональный капитал, закон сочетания континуальности и дискретности географического пространства, закон общественно-географического системообразования. Также авторы обращают внимание на то, что реализация каждого закона сопровождается совокупностью закономерностей [Шарыгин, Столбов, 2020].

Развитие туристско-рекреационного пространства подчиняется законам и закономерностям географического пространства. Но, в отличие от смежных послонных образований общественно-географического пространства (экономического, социального, культурного и др.), туристско-рекреационное пространство формируется под влиянием не столько трудовой, бытовой и иной деятельности людей, сколько под влиянием потребностей поддержания здоровья, умственного совершенствования, удовлетворения любознательности и желания общения с окружающим миром. В этой связи и в условиях формирующегося информационного общества необходимо осуществить поиск новых законов и закономерностей. На наш взгляд, поиск может быть осуществлен в русле изучения ментального туристско-рекреационного пространства, которое, по мнению ученых, существует параллельно с реальным пространством [Александрова, 2020; Liszewski, 2006]. Изучение ментального туристско-рекреационного пространства становится актуальным направлением в эпоху общества впечатлений. Впечатления становятся важнейшим критерием оценки качества отдыха, являются результатом реакции туриста на взаимодействие с отдельными компонентами туристской сферы. Впечатления отражают восприятие туристско-рекреационного пространства туристом или группой туристов [Kowalczyk, 2014]. Нередко впечатления остаются зафиксированными в едином информационном поле в виде цифровых следов.

Безусловно, формулировка новых законов и закономерностей требует проведения серьезных теоретических и прикладных исследований. Поэтому в рамках текущего исследования планируется рассмотреть особенности ментального туристско-рекреационного пространства Кировской области. Цель работы – разработка и апробация методики покомпонентного изучения ментального туристско-рекреационного пространства на основе анализа цифровых следов туристов на примере Кировской области. Выявленные на уровне ментального ту-

ристско-рекреационного пространства особенности и проблемы необходимо анализировать в целях совершенствования деятельности как отдельных компонентов туристско-рекреационного комплекса, так и реального туристско-рекреационного пространства в целом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Значение анализа цифровых следов для изучения поведения населения возрастает с увеличением количества пользователей сети Интернет и все большим вовлечением их в виртуальную жизнь. Предпринимаются попытки анализа поведения пользователей в социальных сетях [Катаев и др., 2021], отслеживания миграционных потоков [Митягина и др., 2021], оценки качества жизни населения регионов России [Щекотин и др., 2020].

В сфере туризма и рекреации изучение социальных сетей, определение их роли в принятии решений путешественниками, а также в туристических операциях и управлении является одной из «мега-тенденций» [Leung et al., 2013]. Кроме социальных сетей, благодаря которым можно определить регион, пол, возраст, интересы пользователя, в качестве источника данных о цифровом следе туриста широко применяются данные сотовых операторов, банков, различных поисковых систем (например, сервис «Яндекс. Подбор слов»). Информация от сотовых операторов позволяет оперативно отследить перемещения потенциальных туристов, на основе банковских данных отслеживаются количество туристов, период пребывания, объем трат, наличие транспорта, причины посещения, частота посещения, среднее число покупок. Поисковые сервисы дают информацию о частоте поисковых запросов, об особенностях цифрового присутствия дестинации в сети Интернет. Интересная методика оценки восприятия географической реальности и территориальных предпочтений основывается на анализе фотоснимков пользователей сервисов Google Earth и Panoramio [Соколова, 2010]. Следует отметить, что получаемая из вышеуказанных источников информация о цифровом следе туристов носит количественный характер и не подходит для изучения ментального туристско-рекреационного пространства. Применение же социологических методов в большинстве случаев представляется достаточно трудоемким процессом.

На наш взгляд, одним из источников данных, который может применяться для анализа цифровых следов туристов в целях изучения ментального туристско-рекреационного пространства, является платформа Tripadvisor. Это крупнейший сайт о туризме и путешествиях, работающий во многих

странах мира и охватывающий значительную аудиторию. На данной платформе после взаимодействия с компонентами реального туристско-рекреационного пространства люди оставляют текстовые сообщения в виде отзыва. Текстовые сообщения, как правило, содержат оценку результата взаимодействия, выраженную как в баллах, так и в виде эмоционального сообщения, что позволяет оценить тональность впечатления. Особенностью сайта является то, что негативные комментарии не удаляются, что делает процедуру оценки более объективной.

Текстовый анализ данных для изучения сферы туризма стал применяться относительно недавно. В основном, применяя подходы машинного обучения для анализа отзывов, размещенных на платформе TripAdvisor, специалисты осуществляют сегментацию потребителей, учатся управлять принятием решений о выборе потребителем дестинации и отелей, а также решать иные маркетинговые задачи [Nilashi et al., 2018; Rosh, 2018; O'Connor, 2010].

Ряд исследований направлен на выявление региональных различий в туристских образах городов [Nowacki, Niezgoda, 2020], оценку отношения к туристским достопримечательностям [Lee et al., 2020] и туристским центрам отдельных стран [Потапов, 2020]. Применение специальных программ для изучения впечатлений туристов и определения тональности отзывов позволяет повысить эффективность управления туристской дестинацией [Sangkaew, Zhu, 2020] и отдельных компонентов туристско-рекреационного комплекса [Stoleriu et al., 2019].

В России попытки оценить отдельные компоненты туристско-рекреационного комплекса с помощью платформы TripAdvisor предпринимались на примере Балтийского региона [Рахманов, 2019б] и крупных городов России [Рахманов, 2019а].

Недостатком данных методик является то, что в них не учитывались содержательные характеристики отзывов туристов, а в расчет принимались только их обобщенные количественные оценки отдельных компонентов туристско-рекреационного пространства.

Предлагаемая нами методика исследования опирается на подходы и методы общественной географии в определении сущности и структуры ментального туристско-рекреационного пространства. Для анализа цифровых следов использовались технологии больших данных (извлечение большого массива данных из TripAdvisor) и машинного обучения (анализ полученных данных – определение тональности и темы отзывов).

Этапы проведения исследования:

1. **Разработка модели изучения ментального туристско-рекреационного пространства.** В на-

шем понимании *ментальное туристско-рекреационное пространство* представляет собой результат взаимодействия объективных свойств компонентов реального туристско-рекреационного пространства с субъективным опытом человека, существующего в виде совокупности впечатлений и цифровых следов. Существовая параллельно, оно повторяет структуру реального туристско-рекреационного пространства, расширяя его.

2. **Формирование базы данных отзывов туристов об отдельных компонентах туристско-рекреационного пространства и классификация текстового контента отобранных в нем объектов.** База данных была сформирована из отзывов пользователей услуг предприятий туристско-рекреационного комплекса Кировской области, размещенных на сайте TripAdvisor, а также на сайтах его организаций. В базу включено 6300 отзывов, оставленных клиентами с 2004 по 2021 г. Все отзывы были распределены по группам, соответствующим компонентам туристско-рекреационного пространства: коллективные средства размещения; культурно-исторический объект; общественное питание; парки отдыха и развлечений; рекреационное предприятие; территория; транспортная инфраструктура; турагентства; рекреационная природная зона и природный туристский объект; туроператоры.

3. **Автоматическая очистка и классификация отзывов туристов о компонентах туристско-рекреационного пространства.** Операция осуществлялась с помощью программы PolyAnalyst. Эта программная платформа от компании Megaputer применяется для визуальной разработки сценариев анализа данных и текстов, а также построения интерактивных отчетов (рис. 1).

4. **Интегральная и покомпонентная оценка восприятия туристско-рекреационного пространства.** На этой стадии также применялась платформа PolyAnalyst. Дополнительно осуществлялись расчет индекса тональности как соотношение положительных и отрицательных отзывов, извлечение ключевых слов, а также выявлялась связь терминов для определения ключевых атрибутов ментального туристско-рекреационного пространства.

5. **Анализ территориальных особенностей восприятия туристско-рекреационного пространства.** Для выявления территориальных особенностей использовался инструмент «поисковые запросы». С его помощью была проведена фильтрация отзывов и их дальнейшая группировка по принадлежности к конкретному месту. Наибольшее количество отзывов было оставлено респондентами в отношении городов Киров, Слободской, Вятские Поляны, Котельнич, Уржум, Советск, Белая Холуница и Омутнинск. В дальнейшем был проведен

текстовый анализ баз данных отзывов о городах Кировской области. Выявлены территориальные особенности распределения параметров тональности отзывов, ключевых слов, ключевых проблем, определены наиболее популярные туристские объекты.

6. На заключительном этапе осуществлялся **анализ изменения индекса тональности отзывов по годам**, что позволило выявить изменение ключевых проблем развития реального туристско-рекреационного пространства в динамике.

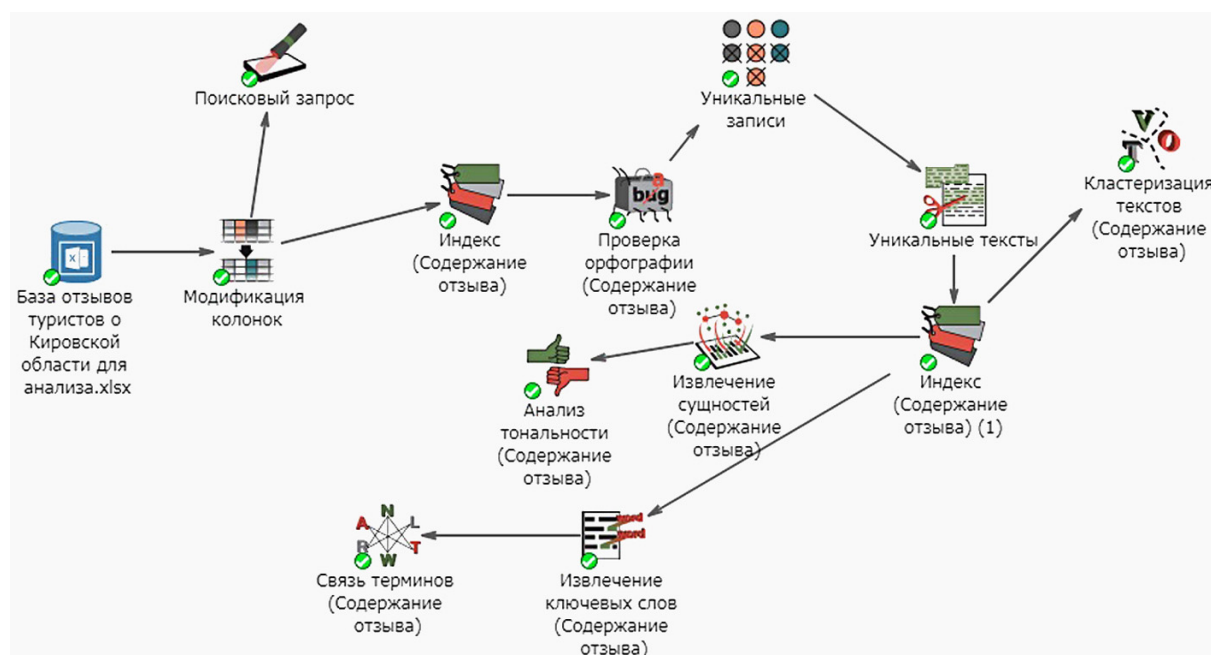


Рис. 1. Общая схема текстового анализа отзывов туристов на платформе PolyAnalyst

Fig. 1. General scheme of text analysis of tourist reviews at the PolyAnalyst platform

Ограничения исследования:

1. Незначительное количество отзывов до 2014 г.
2. Не все предприятия туристско-рекреационной сферы зарегистрированы на платформе Tripadvisor.
3. Как правило, цифровой след фиксируется в отношении тех компонентов, с которыми взаимодействует турист и рекреант и которые вызывают определенные эмоции. В базы отзывов не вошли компоненты реального туристско-рекреационного пространства, с которыми не осуществляется взаимодействие во время туристской поездки или отдыха (например, организационно-управленческий компонент). Немного отзывов и о рекреационных зонах, природных достопримечательностях.

4. В ходе исследования отзывы о туроператорах и турагентах скачивались с официальных сайтов данных организаций, так как на платформе Tripadvisor они отсутствуют.

Выявленные ограничения сужают временной диапазон проведения исследования, вносят определенные корректировки в интерпретации результатов по отдельным компонентам туристско-рекреационного пространства, однако, на наш взгляд, в целом не оказывают существенного влияния на достижение поставленной цели.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кировскую область можно отнести к регионам России, где сфера туризма не относится к отраслям специализации. Вклад туристских предприятий в формирование ВРП региона составляет менее 0,5%. Совокупность физико-географических факторов не позволяет развивать массовые виды туризма. Туристско-рекреационный потенциал является типичным, похожим на многие регионы европейской части страны. Основу туристской специализации области составляет санаторно-курортный комплекс, а большинство посетителей, размещенных в гостиничных организациях, прибывают с деловыми целями. Уровень развития туризма остается низким, несмотря на усилия региональных властей [Коньшев, 2018]. Снижается и доля области среди регионов России по показателям объема потребления услуг предприятий туристской индустрии (рис. 2).

В таких сложных условиях одним из факторов привлечения туристов может стать повышение качества туристского продукта, а также стимулирование развития туризма и рекреации внутри Кировской области. Создание конкурентоспособного и высококачественного продукта невозможно без предва-

рительного анализа и выявления проблемных зон в сфере туристско-рекреационного обслуживания. Важным является определение восприятия туристско-рекреационного пространства и его отдельных компонентов. В ходе исследования ментального туристско-рекреационного пространства было проанализировано 6300 отзывов туристов, определены ключевые слова каждого компонента пространства, рассчитан индекс тональности и выявлены ключевые проблемы его развития (табл. 1).

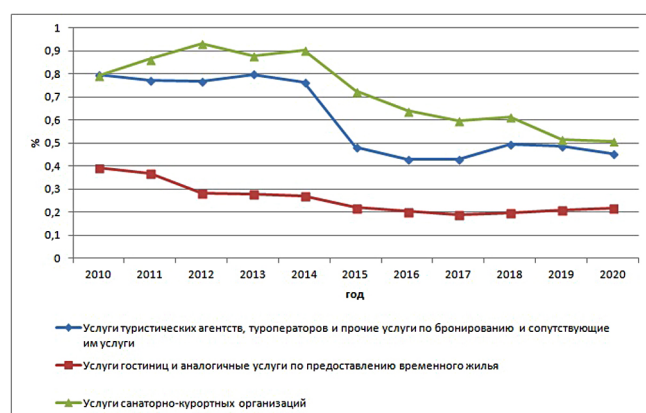


Рис. 2. Изменение доли Кировской области среди регионов России по объему оказания услуг предприятиями туристской индустрии (составлено автором по [ЕМИСС, 2021])

Fig. 2. Change in the share of the Kirov region among the regions of Russia in terms of the volume of services provided by the tourism industry enterprises (compiled by the author according to [EMISS, 2021])

Наибольшее количество отзывов было собрано и обработано в отношении предприятий общественного питания. Отзывы оставляли как местные жители, так и гости региона. На один негативный отзыв в отношении предприятий питания приходится 4,9 положительных. Среди причин негативных отзывов можно выделить как объективные, так и субъективные. К объективным причинам относится недовольство техническим состоянием или интерьером помещений, временем обслуживания, высокой ценой, а среди субъективных причин негатив вызывает в основном вкус блюда. Следует отметить, что среди предприятий общественного питания Кировской области максимальное количество отзывов на портале TripAdvisor оставлено в отношении ресторанов с уникальными концепциями в оформлении, специализирующихся на национальной кухне, а также расположенных в зданиях отелей.

В адрес коллективных средств размещения также поступает большое количество отзывов. На портале TripAdvisor большинство отзывов относятся к гостиницам. Такие отзывы наиболее ценны, так как позволяют выявить отношение к данному ком-

поненту туристско-рекреационного пространства со стороны иностранцев или жителей других регионов. Предпочитая останавливаться в гостиницах, расположенных в центре города, гости чаще всего сталкиваются с проблемой нехватки мест на парковке. Учитывая, что многие отели имеют устаревшую материально-техническую базу и расположены в зданиях, построенных в 1960–1970-х гг., большая доля негативных отзывов касается небольших размеров номеров и оборудования (неработающий кондиционер, плохая шумоизоляция) (рис. 3). На рис. 3 в виде графа визуализирована совокупность эмоционального отношения авторов отзывов по категориям (отмечены серым кружком с белыми линиями) – «Еда и напитки», «Обслуживание клиентов», «Цена» и др. От них отходят линии к ключевым словам. Толщина линии отражает частоту упоминания ключевого слова в различных контекстах в отзывах. Сплошная линия означает преобладание положительных отзывов, пунктирная линия – преобладание отрицательных отзывов. Несмотря на множественные претензии к оборудованию гостиничных номеров, в целом на один негативный отзыв приходится шесть положительных.

Туроператоры являются основой туристской индустрии. Через управление туристскими потоками они могут способствовать расширению или сжатию туристско-рекреационного пространства. На портале TripAdvisor прямых отзывов о туроператорах крайне мало, поэтому для формирования базы исследования использовались данные с официальных сайтов организаций. Возможно поэтому индекс тональности в отношении туроператоров получился самым высоким среди всех компонентов туристско-рекреационного пространства. По состоянию на ноябрь 2021 г. в Кировской области в Едином федеральном реестре туроператоров состоит 14 организаций, большая часть из которых предлагает внутриобластные туры. Наиболее яркие отзывы туристы оставляют после активных туров, сплавов по рекам, где посещение уникальных для Кировской области природных объектов сочетается с анимационными программами. Негативные отзывы были оставлены по поводу организации питания, что можно объяснить низким уровнем развития общественного питания в сельских районах области и ограничениями в организации питания в природоориентированных турах.

Рекреационные предприятия оказывают услуги в основном для местного населения, удовлетворяя потребности в ежедневной рекреации и рекреации выходного дня. Доля туристов среди посетителей музеев и тематических парков Кировской области незначительная. Среди гостей области наибольшим спросом пользуются тематические

парки о динозаврах и сказках. Высокую популярность у гостей областного центра имеют частные музеи, в которых применяются современные технологии создания впечатлений. В районах области местом притяжения туристов и экскурсантов являются краеведческие музеи. Основные проблемы, на которые указывают посетители рекреационных учреждений, связаны с работой персонала, организацией питания. Летом, в выходные дни, недовольство возникает из-за длительного ожидания в очереди. Отношение положительных отзывов к негативным составляет 6,8 к 1.

Самый низкий индекс тональности выявлен в отношении транспортной инфраструктуры: служб такси, аэропорта, ж/д вокзала и качества дорог. На один положительный отзыв приходится один негативный. В то же время перевозка туристов является одним из основных компонентов туристского продукта, а развитие транспортной инфраструктуры – необходимым условием развития туризма и рекреации. Низкое качество услуг по перевозке туристов может негативно влиять на восприятие всего туристско-рекреационного пространства Кировской области (рис. 4).

Таблица 1

Покомпонентный анализ отзывов туристов и рекреантов

Компоненты туристско-рекреационного пространства	Количество отзывов	Инструмент таксономии: ключевые слова (больше 5)	Индекс тональности	Инструмент анализа тональности: ключевые проблемы
Общественное питание	1465	Ресторан, отдых, блюдо, меню, кухня, атмосфера, порция, счет	4,9	Вкус блюда, время обслуживания, высокая цена, вытяжка, интерьер
Коллективные средства размещения	1256	Номер, завтрак, ресторан, окно, кровать, этаж, парковка, стоимость, кондиционер	6	Оборудование, парковка
Туроператоры	782	Поход, корабль, инструктор, поездка, сказка, город, эмоция, впечатление, экскурсия, костер	74,6	Питание в турпоездке
Рекреационное предприятие	630	Музей, город, выставка, экскурсия, шоколад, динозавр, игрушка, мастер-класс, впечатление	6,8	Персонал, ремонт, очередь, работа кафе
Транспортная инфраструктура	602	Вокзал, аэропорт, такси, водитель, машина, заказ, ожидание, туалет, кафе	1,1	Очередь, сервис, парковка, вентиляция
Культурно-исторический объект	520	Город, памятник, монастырь, храм, театр, игрушка, музей	12,1	Фасады зданий, тротуары, информация
Территория	465	Город, музей, дорога, парк, дом, набережная, экскурсия, вода, река, ход, площадь, поездка, лес, магазин, церковь, автобус, озеро, выставка, кафе, житель, театр, завод	2,9	Дороги, вода, климат, фасады домов, инфраструктура,
Парки отдыха и развлечений	311	Парк, набережная, город, пруд, ротонда, река, уточка, аттракцион	8,9	Дорожки, цена на аттракционы, освещение
Турагентства	200	Офис, скидка, бронирование, море, персонал	28,6	Клиенты
Рекреационная природная зона и природный туристский объект	69	Водопад, отдых, камень, озеро, парк	3,3	Страх заблудиться
ИТОГО	6300			

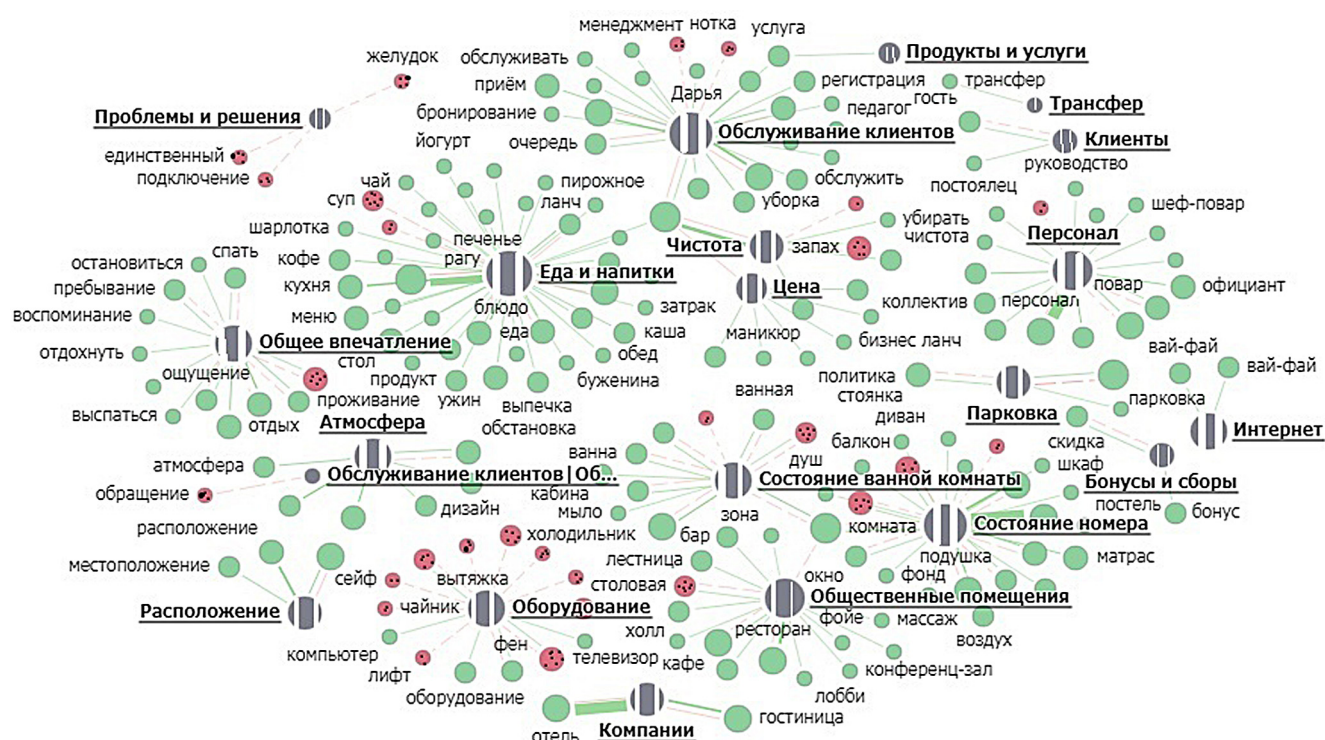


Рис. 3. Анализ тональности в отношении объектов коллективных средств размещения (пунктирными линиями показано преобладание негативных отзывов, сплошными – положительных)

Fig. 3. Sentiment analysis in relation to collective accommodation facilities (dotted lines show the predominance of negative reviews – predominance of negative reviews, solid lines – positive ones)

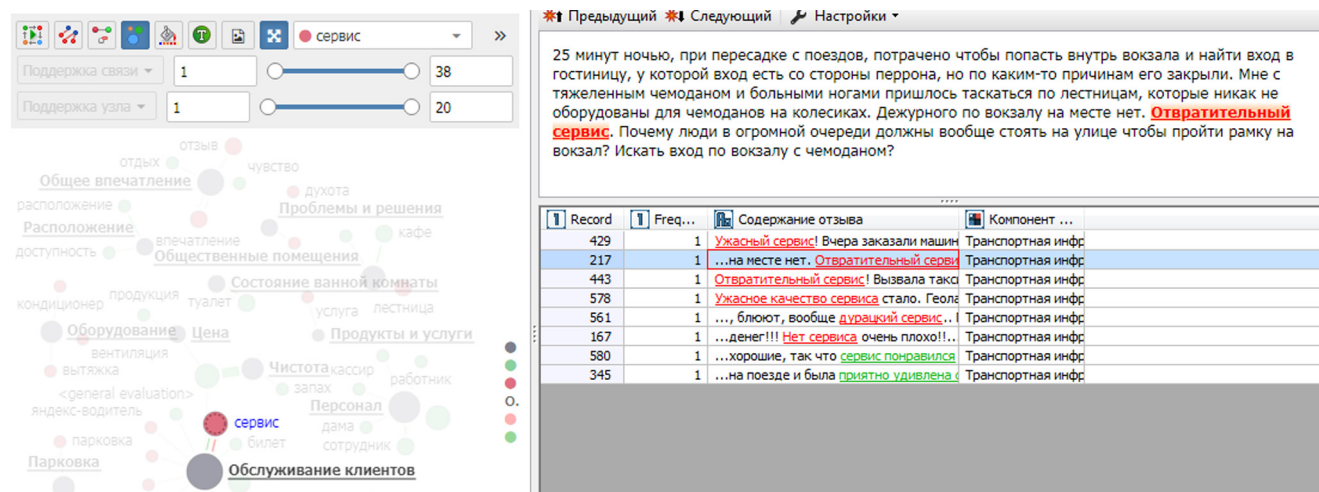


Рис. 4. Пример негативного отзыва в отношении транспортной инфраструктуры (составлено автором)

Fig. 4. An example of negative feedback regarding transport infrastructure (compiled by the author)

Низкие значения индекса тональности характерны для природных зон рекреации и территории в целом. Как правило, положительные эмоции вызывают исторические центры городов Кировской области, парковые зоны, памятники и скульптуры (рис. 5). Негативные отзывы туристы и жители области оставляют из-за некомфортного климата, плохих дорог, разрушающихся фасадов исторических зданий.

Достаточно высокие оценки получили культурно-исторические объекты, прежде всего храмы и монастыри. Кировская область является одним из центров православия в России. На территории области действуют около 40 храмов и часовен, еще большее их количество являются разрушенными и не функционируют. Знаковым мероприятием религиозного характера является Великоорецкий

крестный ход. Это один из самых массовых и протяженных крестных ходов в России – более 10000 паломников проходят 180 км за пять дней.

Географический анализ заключался в выявлении территориальных особенностей восприятия ментального туристско-рекреационного пространства городов Кировской области (табл. 2).

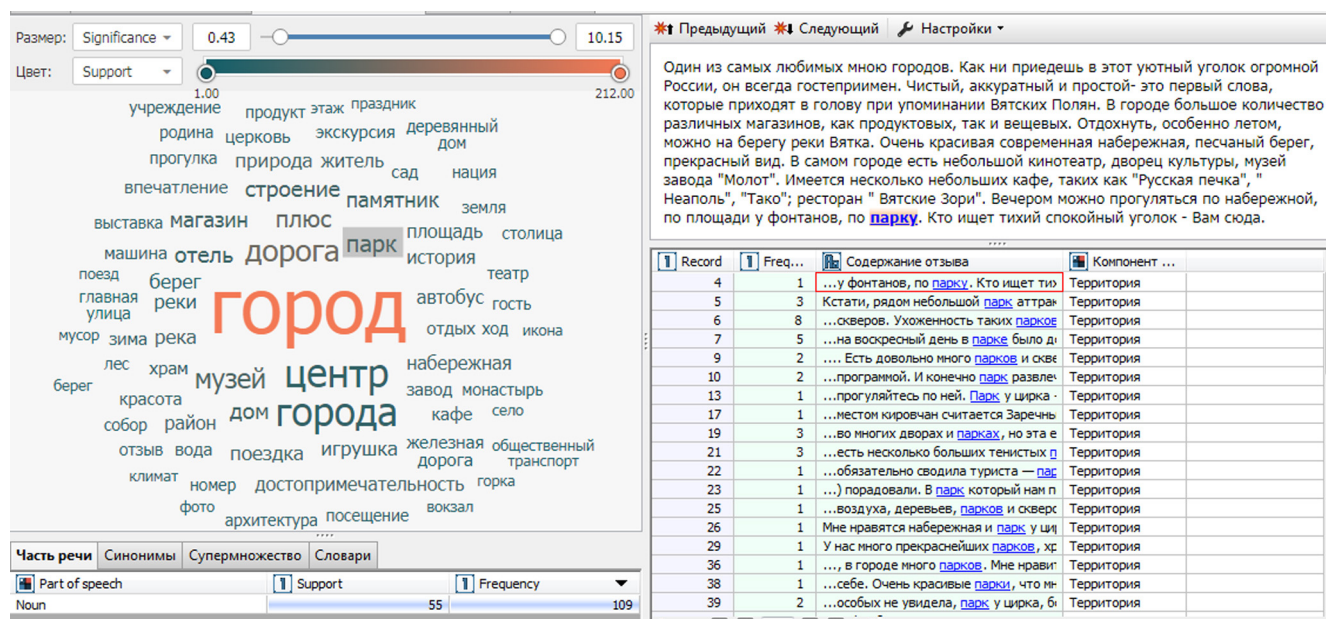


Рис. 5. Облако ключевых слов и пример отзыва по отношению к территории (составлено автором)

Fig. 5. Keyword cloud and the example of recall in relation to territory (compiled by the author)

Таблица 2

Географический анализ отзывов туристов и рекреантов

Города Кировской области	Индекс тональности	Инструмент таксономии: ключевые слова (больше 5)	Инструмент анализа тональности: ключевые проблемы	Туристские объекты
Киров	8,4	Отель, ресторан, музей, парк, Вятка, игрушка	Освещение улиц, парковка, старые дома, тротуары	Заповедник сказок, Музей шоколада, «Летучий корабль», Кировский областной краеведческий музей
Слободской	9,6	Музей, экскурсия, история, главная улица	Дорога, тротуары, питание	Слободской краеведческий музей, водонапорная башня, площадь
Вятские Поляны	7,6	Берег реки, музей, автобус, церковь, молот	Дорога, автостоянка, фасады зданий, мусор	Шпагин, молот, Музей шляп
Омутнинск	3,5	Завод, водохранилище	Гостиницы, дорога, благоустройство	Омутинский пруд, санаторий «Лесная сказка»
Советск	2,0	Природа, вода, пещера, река	Дорога, мусор, освещение, комары	Река Немда, скала Часовой, Бересняцкий водопад, Буржатский утес
Белая Холуница	2,6	Водоохранилище, музей, лошадь	Питание, мусор, освещение, гостиницы	Белохолуницкий пруд, «Грейт-Филд», «Фестиваль Железа», музей
Уржум	2,4	Завод, дорога, природа, озеро	Дороги, тротуары, освещение, мусор	Озеро Шайтан, Музей Кирова, Уржумский спирто-водочный завод

Лучшее соотношение положительных и негативных отзывов отмечается для областного центра, городов Вятские Поляны и Слободской. Это крупнейшие города Кировской области, в которых имеется необходимая инфраструктура для обслуживания туристов. Слободской расположен в 30 км от областного центра и чаще всего туристы посещают его в рамках однодневных экскурсионных программ. Город Вятские Поляны расположен на значительном удалении от областного центра, но достаточно близко от Казани. В городе реализуются масштабные проекты по повышению туристской привлекательности – открыто несколько частных музеев, проводится международный «Фестиваль шляп», реализуются интерактивные программы военно-патриотической направленности. Туристский образ остальных городов Кировской области гораздо хуже. От 30 до 50% всех отзывов включают в себя негативные эмоции от их посещения. Имея несколько туристских объектов, привлекательных для путешественников, эти города не отвечают их запросам по качеству сервиса. Как правило, поездка начинается в Кирове, и туристам необходимо провести в дороге 1,5–3 часа, поэтому много негативных отзывов касается состояния дорожного покрытия. Ключевые проблемы являются общими для всех провинциальных городов области. Это проблемы, связанные с благоустройством территории, состоянием тротуаров, освещением улиц в темное время суток, уборкой мусора. В летний период при посещении природных достопримечательностей туристы и рекреанты жалуются на кровососущих насекомых, отсутствие туалетов, мусор на стоянках.

Покомпонентный и географический анализ цифровых следов позволяет определить проблемные зоны и территории туристско-рекреационного пространства региона. Еще большую ценность имеет информация об изменении восприятия туристско-рекреационного пространства с течением времени (рис. 6). Так, анализ данных за девять лет показывает, что наблюдается снижение индекса тональности восприятия туристско-рекреационного пространства Кировской области.

Доля положительных отзывов снижается, а отрицательных увеличивается. Уже сейчас на три положительных отзыва приходится один отрицательный. То есть порядка 30% гостей уезжает из Кировской области с негативным впечатлением. Такая негативная динамика может привести к дальнейшему снижению популярности Кировской области как туристского направления. А рост недовольства при удовлетворении рекреационных потребностей, низкое качество предоставляемых услуг вынудят местных жителей уезжать в регионы с более высоким качеством жизни.

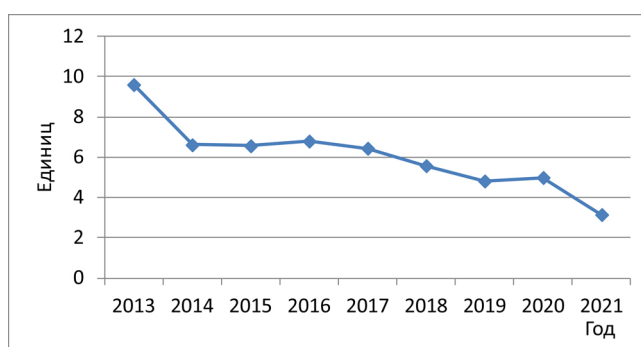


Рис. 6. Изменение индекса тональности восприятия туристско-рекреационного пространства Кировской области (составлено автором)

Fig. 6. Change in the sentiment index of perception of the tourist and recreational space of the Kirov region (compiled by the author)

ВЫВОДЫ

Усиление внимания к ментальному туристско-рекреационному пространству формирует запрос на понимание его сущности, структуры и функций, совершенствование инструментария и методики его изучения, выявление закономерностей формирования и развития. По нашему мнению, ментальное туристско-рекреационное пространство структурно повторяет реальное, и поэтому для его изучения могут применяться методы и подходы общественной географии. В то же время, учитывая отличия в факторах формирования туристско-рекреационного пространства от других послойных образований общественно-географического пространства, требуется переосмысление существующих законов и закономерностей его развития.

Для изучения ментального туристско-рекреационного пространства предлагается метод анализа цифровых следов, который был апробирован на примере Кировской области. На предварительном этапе была сформирована база отзывов туристов и жителей Кировской области. Данные отзывы размещены на портале TripAdvisor и содержат эмоциональную оценку от взаимодействия с компонентами реального туристско-рекреационного пространства региона.

Текстовый анализ цифровых следов позволил определить индекс тональности отзывов и ключевые точки, а также обозначить проблемные зоны в ментальном туристско-рекреационном пространстве Кировской области.

Наибольшие проблемы в развитии туризма характерны для транспортной инфраструктуры и уровня сервиса в обслуживании пассажиров. Данные проблемы важно решить в первую очередь, так как вокзалы и аэропорт являются первыми точками взаимодействия с туристами, и эмоции, получен-

ные в них, зачастую влияют на восприятие всего туристско-рекреационного пространства. Также возникает необходимость усилить контроль и наладить мониторинг за качеством реализации услуг иных сервисных предприятий, а также тех компонентов пространства, которые формируют фоновое впечатление от путешествия.

Географический анализ позволил определить территориальные особенности восприятия туристско-рекреационного пространства городов Кировской области. В области только три города, туристско-рекреационное пространство которых позитивно воспринимается туристами и рекреантами. Малые города и районы области воспринимаются как территории с низким уровнем сервиса и благоустройства, что негативно сказывается на количестве посетителей. Реализации туристского потенциала удаленных от областного центра территорий мешает плохое качество дорожного покрытия, а также отсутствие оборудованных для туристов мест придорожного сервиса. Большое количество негативных отзывов может отпугнуть потенциальных туристов, которые все чаще при планировании путешествия опираются на чужое мнение, зафиксированное в виде цифрового следа на профильных сайтах. Ключевые проблемы, характерные для большинства малых городов, требуют взвешенного решения в реальном и ментальном простран-

стве. Зачастую негативный образ может быть более стойким, и исправить его только лишь устранением проблемы в реальном пространстве невозможно.

Анализ изменения индекса тональности в динамике выявил негативную тенденцию ухудшения восприятия туристско-рекреационного пространства Кировской области. Доля положительных отзывов снижается, снижается и доля Кировской области среди регионов России по объему потребления услуг предприятий туристской индустрии. Однако выявленная зависимость между изменением индекса тональности и показателями развития туризма требует дополнительного доказательства на примере остальных регионов России.

Таким образом, предложенный алгоритм текстового анализа ментального туристско-рекреационного пространства позволяет получить результаты, которые могут использоваться как для совершенствования деятельности отдельных организаций, так и улучшения свойств реального туристско-рекреационного пространства. Дальнейшие перспективы исследований ментального туристско-рекреационного пространства связаны с совершенствованием инструментария исследования и расширением базы отзывов, апробацией методики в отношении других регионов России, поиском закономерностей влияния ментального на реальное туристско-рекреационное пространство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрова А.Ю. Изменение туристского геопространства в эпоху всеобщей мобильности // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 2. С. 3–12.
- Дусенко С.В. Структура и функция социального пространства туризма (социологический анализ): автореф. дис. ... д-ра социол. наук. Хабаровск, 2014. 42 с.
- Замятин Д. Гуманитарная география: пространство, воображение и взаимодействие современных гуманитарных наук // Социологическое обозрение. 2010. Т. 9. № 3. С. 26–50.
- Катаев М.Ю., Орлова В.В., Александрова Ю.К., Петров Е.Ю. Потенциал динамического подхода анализа данных // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 28. С. 636–646.
- Коньшев Е.В. Региональная туристско-рекреационная система Кировской области в туристско-рекреационном пространстве России // География и туризм. 2018. № 2. С. 26–29.
- Мажар Л.Ю. Туризм в пространстве и времени: взгляд географа // Современные проблемы сервиса и туризма. 2014. № 1. С. 16–23.
- Митягина Е.В., Коньшев Е.В., Чернышев К.А., Сайфуллин Э.Р. Цифровые следы выпускников вузов при исследовании миграции из регионов-доноров // Вестн. Томского гос. ун-та. 2021. № 467. С. 144–155. DOI: 10.17223/15617793/467/18.
- Поросенков Ю.В., Худякова Т.М. Формирование отечественной рекреационной географии и проблемы социально-экономико-географических исследований рекреационной деятельности // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Серия: География. Геоэкология. 2009. № 2. С. 5–11.
- Потапов И.А. Особенности туристского развития города Коувала (Финляндия) // Географический вестник. 2020. № 4(55). С. 181–189.
- Рахманов А.Б. Структура привлекательности городов России: переночевать в Москве, погулять по Петербургу и поехать в Казани // Вестн. Томского гос. ун-та. Философия. Социология. Политология. 2019а. № 49. С. 124–139.
- Рахманов А.Б. Туризм и структура привлекательности мегаполисов Балтийского региона // Балтийский регион. 2019б. Т. 11. № 2. С. 73–93.
- Соколова А.А. Виртуальное освоение и виртуальные образы региона (по данным Google Earth и Panoramio) // Известия Русского географического общества. 2010. Т. 142. № 6. С. 31–40.
- Тарасенок А.И. Новые подходы к структурированию туристского пространства: от рекреационных районов к геоэкономическим системам // Вестник БГУ. Сер. 2. Химия. Биология. География. 2010. № 1. С. 95–98.

- Шарыгин М.Д., Столбов В.А. Теоретико-методологические аспекты поиска законов и закономерностей в общественной географии // Географический вестник. 2020. № 1(52). С. 22–32. DOI: 10.17072/2079-7877-2020-1-22-32.
- Шарыгин М.Д., Коньшев Е.В. Туристско-рекреационное пространство: географические особенности формирования, территориализации и функционирования // Пространственная организация общества: теория, методология, практика: сб. материалов Международной научно-практической конференции, Пермь, 07–11 ноября 2018 г. / под ред. Т.В. Субботиной, Л.Б. Чупиной. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2018. С. 115–119.
- Щекотин Е.В., Коварж Г.Ю., Гойко В.Л., Петров Е.Ю., Бакулин В.В. Оценка качества жизни населения регионов РФ на основе цифровых данных: методологические аспекты // Векторы благополучия: экономика и социум. 2020. № 3(38). С. 138–156.
- Kowalczyk A. The phenomenology of tourism space, *Tourism*, 2014, vol. 24, no. 1, p. 9–15.
- Lee J., Benjamin S., Childs M. Unpacking the Emotions behind TripAdvisor Travel Reviews: The Case Study of Gatlinburg, Tennessee, *International Journal of Hospitality & Tourism Administration*, 2020, DOI: 10.1080/15256480.2020.1746219.
- Leung D., Law R., Hoof van H., Buhalis D. Social Media in Tourism and Hospitality: A Literature Review, *Journal of Travel & Tourism Marketing*, 2013, vol. 30:1-2, p. 3–22, DOI: 10.1080/10548408.2013.750919.
- Liszewski S. Przestrzeń turystyki i ich transformacja we współczesnym świecie, *Turyzm (Łódź)*, 2006, t. 16, z. 2, p. 7–19.
- Nilashi M., Ibrahim O., Yadegaridehkordi E., Samad S., Akbari E., Alizadeh A. Travelers decision making using online review in social network sites: a case on Tripadvisor, *Journal of Computational Science*, 2018, vol. 28, p. 168–179, DOI: 10.1016/j.jocs.2018.09.006.
- Nowacki M., Niezgoda A. Identifying unique features of the image of selected cities based on reviews by Trip Advisor portal users, *Scandinavian Journal of Hospitality and Tourism*, 2020, vol. 20:5, p. 503–519, DOI: 10.1080/15022250.2020.1833362.
- O'Connor P. Managing a Hotel's Image on TripAdvisor, *Journal of Hospitality Marketing & Management*, 2010, vol. 19:7, p. 754–772, DOI: 10.1080/19368623.2010.508007.
- Roshi E. Conjoint analysis and online forums on cultural heritage in Albania – analysing Tripadvisor reviews, *European Journal of Economics and Management Sciences*, 2018, no. 1, p. 3–14.
- Sangkaew N., Zhu H. Understanding Tourists' Experiences at Local Markets in Phuket: An Analysis of TripAdvisor Reviews, *Journal of Quality Assurance in Hospitality & Tourism*, 2020, DOI: 10.1080/1528008X.2020.1848747.
- Stoleriu O.M., Brochado A., Rusu A., Lupu C. Analyses of Visitors' Experiences in a Natural World Heritage Site Based on TripAdvisor Reviews, *Visitor Studies*, 2019, vol. 22:2, p. 192–212, DOI: 10.1080/10645578.2019.1665390.

Электронный ресурс

ЕМИСС – Единая межведомственная информационно-статистическая система: государственная статистика. URL: <https://www.fedstat.ru/organizations/> (дата обращения 25.11.2021).

Поступила в редакцию 07.12.2021

После доработки 25.02.2022

Принята к публикации 09.03.2022

METHODS OF STUDYING MENTAL TOURIST-RECREATION SPACE BASING ON TOURIST REVIEWS (CASE STUDY OF THE KIROV REGION)

E.V. Konyshev

Perm State National Research University, Department of Social-Economic Geography, Acting Head of the Department;
Vyatka State University, Department of Tourism and Personnel Management,
Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: konj@bk.ru

Impressions become a key criterion of the effective organization of recreation and tourism in the modern world. The efforts of organizations of the tourist and recreational complex are directed at forming impressions, scenarios of tourist products are being built, and tourists share their impressions on the Internet. The relevance of studying the mental tourist and recreational space using new methods of digital analysis is increasing. The method of text analysis is advisable to assess the mental tourist and recreational space, because the feedback of tourists fixes the emotional state and the impressions of interaction with the real component of tourist and recreational space. The paper presents an analytical review of scientific approaches to the study of mental tourist and recreational space, the application of methods for its assessment and the analysis of digital trail of tourists, as well as the experience of applying text analysis to study the tourist reviews. The information base of the study was compiled from the reviews of tourists and recreants downloaded from the Tripadvisor platform. Feedback base processing and text analysis was carried out using the PolyAnalyst program. The database consisted of 6,300 reviews. The sentiment index was calculated, keywords were extracted, and the relationship of terms was determined to find the key attributes of the mental tourist and recreational space. A component-by-component analysis of the sentiment index and the analysis of its changes from 2013 to 2021 were carried out. Additionally, a geographical analysis was carried out with the identification of territorial features of the percep-

tion of tourist and recreational space of the cities of the Kirov region. Conclusions are made about the negative perception of transport infrastructure, natural objects and recreational areas, as well as the improvement of the territory of settlements of the Kirov region. The increasing share of negative reviews was recorded over time. The results of the investigation could be useful to eliminate the problems of interaction between the population and the components of the real tourist and recreational space and to adjust the regional tourism policy. The proposed methodology could be applied to assess the mental tourist space in other regions of Russia and the world.

Keywords: PolyAnalyst, Tripadvisor, text analysis, the sentiment index

REFERENCES

- Aleksandrova A.Yu. Izmenenie turistskogo geoprostranstva v epokhu vseobshchei mobil'nosti [Changes of touristic geo-space in the epoch of universal mobility], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 2, p. 3–12. (In Russian)
- Dusenko S.V. *Struktura i funktsiya sotsial'nogo prostranstva turizma (sotsiologicheskii analiz)* [The structure and function of the social space of tourism (sociological analysis)], Ph.D. Thesis in Sociology, Khabarovsk, 2014, p. 42. (In Russian)
- Kataev M.Yu., Orlova V.V., Aleksandrova Yu.K., Petrov E.Yu. Potentsial dinamicheskogo podkhoda analiza dannykh [Potential of the Dynamic Data Analysis Approach], *Innovatsii, Nauka, Obrazovanie*, 2021, no. 28, p. 636–646. (In Russian)
- Konyshev E.V. Regional'naya turistsko-rekreatsionnaya sistema Kirovskoi oblasti v turistsko-rekreatsionnom prostranstve Rossii [Regional tourist and recreational system of the Kirov region in the tourist and recreational space of Russia], *Geografiya i turizm*, 2018, no. 2, p. 26–29. (In Russian)
- Kowalczyk A. The phenomenology of tourism space, *Tourism*, 2014, vol. 24, no. 1, p. 9–15.
- Lee J., Benjamin S., Childs M. Unpacking the Emotions behind TripAdvisor Travel Reviews: The Case Study of Gatlinburg, Tennessee, *International Journal of Hospitality & Tourism Administration*, 2020, DOI: 10.1080/15256480.2020.1746219.
- Leung D., Law R., Hoof van H., Buhalis D. Social Media in Tourism and Hospitality: A Literature Review, *Journal of Travel & Tourism Marketing*, 2013, vol. 30:1–2, p. 3–22, DOI: 10.1080/10548408.2013.750919.
- Lisowski S. Przestrzenie turystyki i ich transformacja we wspolczesnym swiecie, *Turyzm (Łódź)*, 2006, t. 16, z. 2, p. 7–19.
- Mazhar L.Yu. Turizm v prostranstve i vremeni: vzglyad geografa [Tourism in space and time: a geographer's view], *Sovremennye problemy servisa i turizma*, 2014, no. 1, p. 16–23. (In Russian)
- Mityagina E.V., Konyshev E.V., Chernyshev K.A., Saifulin E.R. Tsifrovye sledy vypusnikov vuzov pri issledovanii migratsii iz regionov-donorov [Digital traces of university graduates in the study of migration from donor regions], *Vestn. Tomskego gos. un-ta*, 2021, no. 467, p. 144–155, DOI: 10.17223/15617793/467/18. (In Russian)
- Nilashi M., Ibrahim O., Yadegaridehkordi E., Samad S., Akbari E., Alizadeh A. Travelers decision making using online review in social network sites: a case on Tripadvisor, *Journal of Computational Science*, 2018, vol. 28, p. 168–179, DOI: 10.1016/j.jocs.2018.09.006.
- Nowacki M., Niezgoda A. Identifying unique features of the image of selected cities based on reviews by TripAdvisor portal users, *Scandinavian Journal of Hospitality and Tourism*, 2020, vol. 20:5, p. 503–519, DOI: 10.1080/15022250.2020.1833362.
- O'Connor P. Managing a Hotel's Image on TripAdvisor, *Journal of Hospitality Marketing & Management*, 2010, vol. 19:7, p. 754–772, DOI: 10.1080/19368623.2010.508007.
- Porosenkov Yu.V. Formirovanie otechestvennoi rekreatsionnoi geografii i problemy sotsial'no-ekonomiko-geograficheskikh issledovaniy rekreatsionnoi deyatel'nosti [Formation of domestic recreational geography and the problems of socio-economic-geographical study of recreational activities], *Vestn. Voronezhskogo gos. un-ta, Ser.: Geografiya, Geoekologiya*, 2009, no. 2, p. 5–11. (In Russian)
- Potapov I.A. Osobennosti turistskogo razvitiya goroda Kouvola (Finlyandiya) [Specific features of tourism development in the city of Kouvola (Finland)], *Geograficheskii vestn.*, 2020, no. 4 (55), p. 181–189. (In Russian)
- Rakhmanov A.B. Struktura privlekatel'nosti gorodov Rossii: perenochevat' v Moskve, pogulyat' po Peterburgu i poest' v Kazani [Structure of the attractiveness of Russian cities: spending a night in Moscow, walking around St. Petersburg and eating in Kazan], *Vestn. Tomskego gos. un-ta, Filosofiya, Sotsiologiya, Politologiya*, 2019, no. 49, p. 124–139. (In Russian)
- Rakhmanov A.B. Turizm i struktura privlekatel'nosti megalopolisov Baltijskogo regiona [Tourism and the structure of attractiveness of the Baltic region megalopolises], *Baltiiskii region*, 2019, vol. 11, no. 2, p. 73–93. (In Russian)
- Roshi E. Conjoint analysis and online forums on cultural heritage in Albania – analysing Tripadvisor reviews, *European Journal of Economics and Management Sciences*, 2018, no. 1, p. 3–14.
- Sangkaew N., Zhu H. Understanding Tourists' Experiences at Local Markets in Phuket: An Analysis of TripAdvisor Reviews, *Journal of Quality Assurance in Hospitality & Tourism*, 2020, DOI: 10.1080/1528008X.2020.1848747.
- Sharygin M.D., Stolbov V.A. Teoretiko-metodologicheskie aspekty poiska zakonov i zakonomernostei v obshchestvennoi geografii [Theoretical and methodological aspects of the search for laws and regularities in social geography], *Geograficheskii vestnik*, 2020, no. 1(52), p. 22–32, DOI: 10.17072/2079–7877–2020–1–22–32. (In Russian)
- Sharygin M.D., Konyshev E.V. [Tourist and recreational space: geographical features of formation, territorialization and functioning], *Prostranstvennaya organizatsiya obshchestva: teoriya, metodologiya, praktika* [Spatial organization of society: theory, methodology, practice] Perm', Permskii gosudarstvennyi natsional'nyi issledovatel'skii universitet, 2018, p. 115–119. (In Russian)
- Shchekotin E.V., Kovarz G.Yu., Goiko V.L., Petrov E.Yu., Bakulin V.V. Otsenka kachestva zhizni naseleniya re-

- gionov RF na osnove tsifrovyykh dannyykh: metodologicheskie aspekty [Assessment of the quality of life of the population of RF regions on the basis of digital data: methodological aspects], *Vektory blagopoluchiya: ekonomika i sotsium*, 2020, no. 3 (38), p. 138–156. (In Russian)
- Sokolova A.A. Virtual'noe osvoenie i virtual'nye obrazy regiona (po dannym Google Earth i Panoramio) [Virtual exploration and virtual images of a region (according to Google Earth and Panoramio)], *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2010, vol. 142, no. 6, p. 31–40. (In Russian)
- Stoleriu O.M., Brochado A., Rusu A., Lupu C. Analyses of Visitors' Experiences in a Natural World Heritage Site Based on TripAdvisor Reviews, *Visitor Studies*, 2019, vol. 22:2, p. 192–212, DOI: 10.1080/10645578.2019.1665390.
- Tarasenok A.I. Novye podkhody k strukturirovaniyu turist-skogo prostranstva: ot rekreatsionnykh raionov k geoeconomicheskim sistemam [New approaches to structuring the tourist space: from recreational areas to geoeconomic systems], *Vestn. BGU, Ser. 2, Khimiya, Biologiya, Geografiya*, 2010, no. 1, p. 95–98. (In Russian)
- Zamyatin D. Gumanitarnaya geografiya: prostranstvo, voobrazhenie i vzaimodeistvie sovremennykh gumanitarnykh nauk [Humanitarian Geography: Space, Imagination and Interaction of Contemporary Humanities], *Sotsiologicheskoe obozrenie*, 2010, vol. 9, no. 3, p. 26–50. (In Russian)
- Web sources*
- Edinaya mezhvedomstvennaya informacionno-statisticheskaya sistema [Unified interdepartmental information and statistical system], URL: <https://www.fedstat.ru/organizations/> (access date 11.25.2021). (In Russian)
- EMISS – Edinaya mezhvedomstvennaya informatsionno-statisticheskaya sistema: gosudarstvennaya statistika [Unified Interdepartmental Information and Statistical System: State Statistics], URL: <https://www.fedstat.ru/organizations/> (access date 25.11.2021).

Received 07.12.2021

Revised 25.02.2022

Accepted 09.03.2022

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 556.537; 551.435.133

РАЗМЫВЫ ПОЙМЕННЫХ БЕРЕГОВ И ЭВОЛЮЦИЯ ФОРМ РУСЕЛ РЕК КАК ФАКТОРЫ ПЕРЕСТРОЙКИ РУСЛОВОЙ СЕТИ

Р.С. Чалов¹, А.А. Куракова², Н.М. Михайлова³, С.Н. Рулева⁴

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, кафедра гидрологии суши*

^{3,4} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева*

¹ *Д-р геогр. наук, проф.; e-mail: rschalov@mail.ru*

² *Аспирант; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru*

³ *Канд. геогр. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: nmmikhailova@yandex.ru*

⁴ *Канд. геогр. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: mnksl@vandex.ru*

Рассматриваются установленные основные схемы переформирования русел, приводящие к смене их морфодинамического типа и изменениям в структуре русловой сети в днищах речных долин, особенно на реках с разветвленным руслом. Размывы пойменных берегов рек на излучинах русла (в их привершинных частях и на крыльях) и излучинах рукавов разветвлений приводят к образованию проранов между рукавами, в том числе рукавами раздвоенных русел, основным руслом и пойменными протоками или руслами низовьев притоков (малых рек), протекающих в тыловых частях пойм главных рек. В результате происходит расчленение раздвоенных русел, превращение одного из рукавов в пойменную протоку или, наоборот, пойменной протоки в основной рукав (происходит «перехват» стока), формирование пойменно-русловых разветвлений, иногда трех- или четырехрукавных, из-за происходящего при этом перераспределения стока между рукавами. При этом возникают иногда нехарактерные для той или иной реки разновидности разветвлений. В меандрирующих руслах развитие прорванных излучин может явиться первоосновой для формирования раздвоенного русла, а само образование прорванных излучин создает условие для рассредоточения потока по вновь возникшим при спрямлении русла рукавам. Сложные изменения структуры русловой сети характерны для узлов слияния меандрирующих рек. Все эти трансформации – следствие эволюции (саморазвития) форм русел и размывов берегов, несвязанные с изменениями факторов русловых процессов (стока воды и наносов), что нужно учитывать при палеорусловых и палеогидрологических реконструкциях, а также при прогнозировании русловых деформаций и разработке проектов регуляционных мероприятий при водохозяйственном и водотранспортном освоении рек.

Ключевые слова: русловые процессы, излучины, рукава, разветвленное русло, пойменные протоки, раздвоенное русло, острова

ВВЕДЕНИЕ

Русловые деформации всегда приводят к изменению конфигурации, параметров и морфологии речных русел. В зависимости от условий их формирования они или очень замедленны, проявляясь на реках с врезанным руслом, берега которых сложены трудно, или практически не размываемыми горными породами или отложениями в течение геологических отрезков времени (условия ограниченного развития русловых деформаций), или совершавшиеся «на глазах», вызывая миграцию русла в пределах днища долины, сопровождаясь интенсивными размывами берегов, смещением излучин

и ростом извилистости русла, развитием одних и отмиранием других рукавов (широкопойменные русла в условиях свободного развития русловых деформаций). Это происходит обычно в ходе эволюции (саморазвития) форм русла (излучин, разветвлений) на протяжении многих лет и десятилетий и фиксируется за историческое время составленными картами и планами русел, а последнее столетие – космическими снимками. Такие переформирования достаточно хорошо изучены, им посвящена обширная литература [Маккавеев, 1955; Кондратьев и др., 1959; Попов, 1965; Чалов, 1979, 2011; Назаров, Егоркина, 2004; Schumm, 1977; Knighston, 1998;

Robert, 2003 и др.]. Но нередко они осуществляются очень быстро, приводя к перестройкам русла в очень короткие сроки, часто при прохождении экстремально высоких половодий и паводков или в годы повышенной водности. Первые характерны для рек Приморья [Гарцман и др., 2015], отличающихся регулярными катастрофическими наводнениями. Примером вторых являются прорывы серии излучин на Северной Двине у с. Красноторска в многоводный период конца XIX – начала XX в., охвативший участок реки длиной около 30 км [Каргаполова, 2006], и массовое спрямление излучин на верхней Каме в XV–XVI и в XIX – начале XX вв. [Назаров и др., 2014]. То же происходит при достижении излучинами русла или рукавов разветвлений критических значений параметров, вследствие чего они спрямляются с образованием прорванных излучин. Таковы перестройки Саралевского разветвления на нижней Волге, в котором только за XX в. дважды произошло спрямление крутой излучины на заходе в левый рукав – протоку Коршевитую [Попов, Кондигерева, 1974; Чалов, Завадский, 2019]. Известны оценки таких перестроек русловой сети в течение позднего плейстоцена – голоцена на основе палеоруслового анализа рельефа поймы и палеогидрологических реконструкций [Чернов, Гаррисон, 1981; Панин и др., 1992; Сидорчук и др., 2000]. В последнее время появились работы, в которых современная трансформация русла (изменение их морфодинамического типа) связывается с происходящим увеличением стока и другими изменениями природной среды и климата [Чалов и др., 2019].

В то же время практически неосвоенными остаются перестройки речной сети, особенно на больших и крупнейших реках, связанные с размывами пойменных берегов и эволюцией форм русел, приводящих к образованию проранов и перераспределению стока между основным руслом и бывшими второстепенными рукавами и пойменными протоками, изменению их роли в русловом режиме рек. Формы таких перестроек достаточно разнообразны, сопровождаясь перераспределением стока воды и возникновением водохозяйственных и воднотранспортных проблем. Задача настоящей статьи – на конкретных примерах рассмотреть основные типы таких перестроек русловой сети, их связь с морфологией и устойчивостью русел, последствия при освоении речных ресурсов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу статьи положены результаты многолетних исследований русловых процессов на реках Северной Евразии, позволившие выполнить анализ

переформирования русел, установить их основные типы и роль размывов пойменных берегов и эволюции форм русел как непосредственные причины перестройки русловой сети. Натурные (полевые) исследования включали измерения расходов воды в рукавах, протоках и образующихся проранах, в том числе с использованием современной аппаратуры (доплеровский измеритель течений), поперечных уклонов водной поверхности, определение темпов и протяженности фронта размыва и литологии размываемых берегов, съемку и промеры русла, его рукавов и протока. Полученные материалы накладывались на ретроспективный анализ переформирования русла, выполняемый по сопоставлению (совмещению) разновременных лоцманских карт и карт русел судоходных рек, издаваемых регулярно с интервалом 5–15 лет в течение XX в. (последние карты были изданы в начале XXI в.), а также планов перекатных участков, ежегодно получаемых изыскательскими партиями на водных путях. Использовались и сопоставлялись космические снимки за период 1968–2019 гг. серии CORONA KH, Landsat 5 TM, Sentinel-2, что позволило определить скорости размыва (отступления) берегов и их изменение во времени, а по рельефу поймы реконструировать прошлые положения береговых линий там, где временные изменения переформирования выходят за пределы показателей, имеющих в документальных источниках.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Размывы берегов рек – наиболее яркое проявление русловых деформаций. Сопровождаясь образованием прирусловых отмелей у противоположных берегов (их намывом), они обуславливают изменение параметров русловых форм, их продольное и поперечное смещение, возрастая по мере искривления потока, при увеличении углов подхода его к берегам или уменьшении при спрямлении русла. Эти изменения во времени связаны с трансформацией кинематической структуры потока (по выражению М. А. Великанова [1958]: «Поток управляет руслом, но русло управляет потоком»), но скорости размыва всегда зависят также от литологии слагающих берега отложений, от устойчивости русла, мощности потока [Куракова, Чалов, 2020]. Размывы/намывы берегов рек в пределах излучин или разветвлений сопровождаются изменением их конфигурации. Например, излучина русла со временем превращается из пологой сегментной в крутую и, если на этой стадии не происходит ее спрямление, в петлеобразную; искривление из-за размыва, вогнутого (намыва выпуклого) берега на изгибах русел рукавов приводит к перераспределению расходов воды меж-

ду ними, обмелению одного и развитию другого (и активизации в нем размывов берегов). Но в этих случаях перестройка русловой сети не происходит, имеют место лишь изменения положения, параметров и очертаний форм русла. Скорости же размыва берегов в зависимости от сочетания всех факторов и условий изменяются на разных реках в очень широких пределах. Так, на средней и нижней Оби они находятся в пределах (по максимальным значениям) от 1,5–2 до 10–15 м/год, тогда как на нижней Волге в Саралевском разветвлении зафиксированы до 60 м/год [Попов, Кондирева, 1974].

Спрявление излучин можно рассматривать как элементарную форму перестройки русла. В зависимости от условий спрявление осуществляется в двух основных вариантах. Первый – при достижении в процессе эволюции стадии развитой или крутой излучины [Чалов и др., 2004] со степенью развитости $l/L = 1,4 \div 2,0$ (l – длина русла по излучине, L – ее шаг), но при условии прохождения руслоформирующего расхода при глубоко затопленной пойме и образования через пойменную шпору излучины транзитного течения. В этом случае роль размывов берегов, скорость которых воз-

растает при увеличении l/L , сводится к достижению излучиной критических величин l/L , но само спрявление происходит путем образования спрямляющей протоки обычно в тыловой части шпоры. В результате формируется прорванная излучина (по терминологии ГГИ [Попов, 1965; Кондратьев и др., 1982] – незавершенное меандрирование), создающая разветвление русла, в котором функционируют и новое спрямленное русло, и старое. В зависимости от местных условий распределение расходов воды между ними может быть различным. Формирование прорванных излучин на смежных излучинах может привести к образованию трех-, четырехрукавного пойменно-руслового разветвления с меандрирующими рукавами (рис. 1). Возможна трансформация серии прорванных излучин в пойменную многорукавность или даже в раздвоенное русло, когда рукава прорванных излучин сосредотачивают потоки воды, затопившей пойму, объединяются, образуя пойменные протоки (ответвления) или альтернативные основному руслу рукава, равноценные ему по водности. Такого, по-видимому, происхождения раздвоенных русел на широтном участке средней и на нижней Оби.

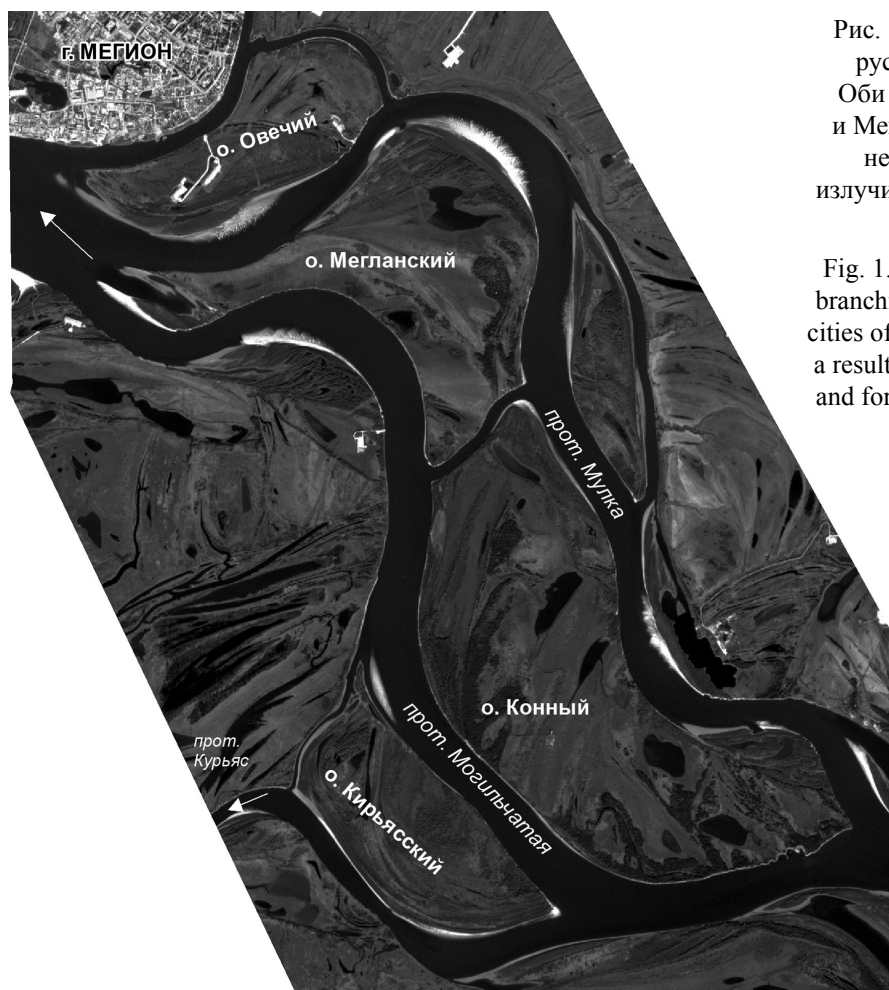


Рис. 1. Сложное трехрукавное пойменно-русловое разветвление русла средней Оби (между городами Нижневартовском и Мегионом), образовавшееся вследствие неоднократного спрямления крутых излучин и образования прорванных излучин (космоснимок)

Fig. 1. Complex three-arm floodplain-channel branching of the Middle Ob River (between the cities of Nizhnevartovsk and Megion), formed as a result of repeated straightening of acute bends and formation of cut-off bends (satellite image)

Второй вариант – если излучина на стадии развитой или крутой не спрямляется, то она со временем приобретает петлеобразную форму, и тогда ее спрямление возможно благодаря встречному размыву берегов в верхнем и нижнем крыльях, т.е. именно размывы берегов на крыльях излучин, трансформация шпоры в шейку петлеобразной излучины и последующее ее уничтожение при сближении раз-

мываемых берегов. Образующиеся при этом староречья, отшнуровываются от русла, превращаясь в старичные озера. Иногда староречье заполняется наносами и зарастает в верхней своей части, тогда как нижняя сохраняется в виде залива – курьи. Таким образом, собственно перестройка русла завершается спрямлением излучины, отмиранием старой и развитием новой (рис. 2).

Более масштабны перестройки русловой сети из-за размыва берегов на реках с разветвленным или раздвоенным руслом с развитой пойменной многорукавностью. Рукава раздвоенных русел характеризуются развитием русловых (островных) разветвлений, меандрируют или, при расположении вдоль коренных берегов, имеют относительно прямолинейное русло, но с извилинами динамической оси потока, огибающем побочни, либо с осередковыми или островными разветвлениями второго порядка. Во всех случаях стрежень потока изгибается, прижимаясь к вогнутым берегам (излучин или противоположным островам, осередкам и побочням), вызывая их размыв, скорость которого зависит от степени развитости изгиба (излучин, извилины динамической оси потока) и водности рукавов (проток). Размывы берегов приводят к расчленению больших островов, размывам пойменных перешейков между основным руслом и пойменными протоками или рукавами раздвоенного русла. Образующиеся прораны вызывают перераспределение стока, вследствие чего происходит развитие бывших ранее маловодными рукавов или пойменных проток при одновременном обмелении и утрате значимости бывшего основного рукава и т.д. Среди всего многообразия таких перестроек русловой сети разветвленных русел выделяется несколько их наиболее характерных схем развития.

1. Эволюция форм русел рукавов раздвоенного русла и размывы поймы между ними (пойменные межукавья, по [Смирнова, 2002]) приводят к расчленению раздвоенных русел на части с превращением на участке разрыва одного из рукавов в пойменную протоку. На средней Оби (широтный участок) таким образом произошло разделение левого рукава раздвоенного русла на три составляющие (Юганскую Обь, Большую Салымскую протоку и протоку Неулеву). В верхней части Юганской Оби ее протяженный отрезок трансформировался в пой-

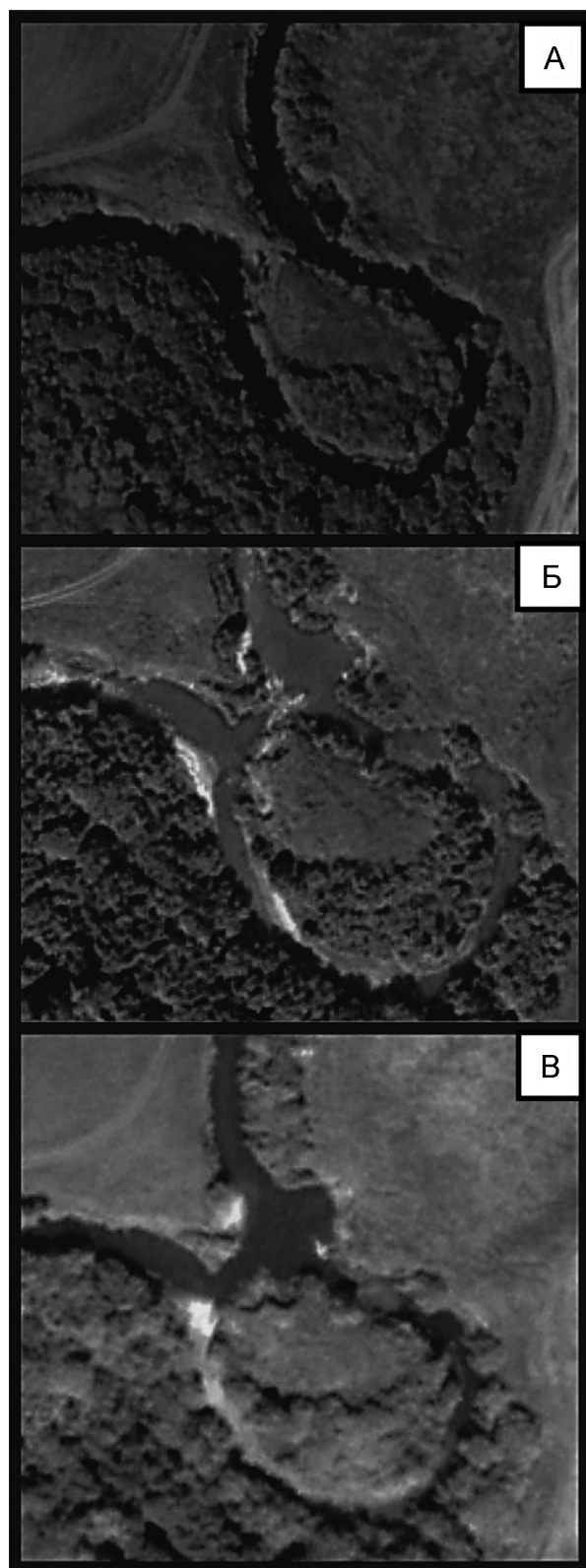


Рис. 2. Спрямоление петлеобразной излучины р. Озерки (Приволжская возвышенность) вследствие встречного размыва берегов и отмирание старого русла: А – 2007 г.; Б – 2010 г.; В – 2012 г.

Fig. 2. Straightening of the loop-shaped bend of the Ozerki River (Volga Upland) due riverbank erosion and the dying off of the old channel: А – 2007; Б – 2010; В – 2012

менную протоку Покомас и в левый рукав – протоку Пеньковскую самостоятельного трехрукавного пойменно-руслового разветвления вследствие размывов вогнутых берегов излучин. В последнем случае (рис. 3А) сток Юганской Оби ниже образовавшегося прорана, который, размываясь, сейчас расширился на 2,5 км, был перехвачен основным правым рукавом реки, а часть самого русла превратилась в пойменную протоку Покомас (ее водность в половодье не превышает 5% от стока Оби), впадающую ниже по течению в Юганскую Обь. Остальная верхняя часть Юганской Оби (сейчас это протока Пеньковская) вошла в состав пойменно-руслового разветвления; излучина, размывы вогнутого берега которой привели к перестройке русла, достигнув степени развитости, превышающей критическое значение ($l/L = 1,8$, где l – длина русла по излучине, L – ее шаг), спрямилась (это произошло в 1980-е гг.),

образовав протоку Быструю. В результате возникло сложное пойменно-русловое разветвление с тремя меандрирующими рукавами, водность которых составляет от стока реки 19% (Пеньковская протока), 27% (спрямленная излучина – центральный рукав разветвления) и 67% (протока Быстрая – сейчас судоходный рукав).

Аналогичная перестройка рукавов, приведшая к разделению единого левого рукава раздвоенного русла, произошла между современной Юганской Обью и Большой Салымской протокой, где в результате размывов пойменных перешейков, спрямления и образования прорванных излучин также образовалось сложное трехрукавное пойменно-русловое разветвление с меандрирующими рукавами (рис. 3Б), водность которых составляют левый, бывший в прошлом частью рукава раздвоенного русла (23%), центральный судоходный (Омулька, 48%) и правый (Сытоминка, 30%) протоки.

Участок русла между слиянием правого рукава с Большой Салымской протокой и ответвлением от нее протоки Неулева образовался из-за встречного размыва берегов в обоих рукавах и «перехвата» стока бывшего правого рукава Оби, который теперь превратился в пойменную, но достаточно многоводную Чебыковскую протоку (рис. 3В), доля стока в которой в половодье составляет 16%.

2. Противоположные последствия перестройки русловой сети происходят при размыве пойменных берегов между основным руслом и пойменными протоками, которые в этом случае, принимая часть

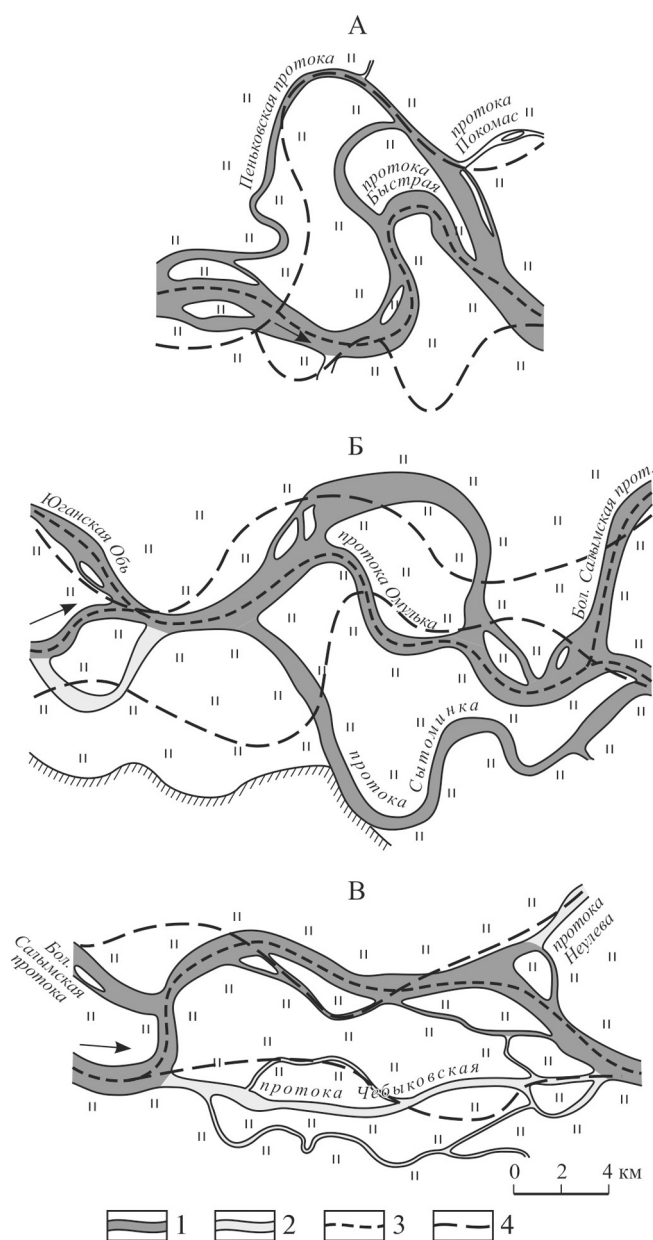


Рис. 3. Трансформация раздвоенного русла средней Оби вследствие размыва берегов на излучинах основных рукавов (реставрация по рельефу поймы): А – превращение верхней части Юганской Оби в современный рукав в сложном пойменно-русловом разветвлении – протоку Пеньковскую и пойменную протоку Покомас; Б – расчленение левого рукава раздвоенного русла на Юганскую Обь и Большую Салымскую протоку и образование сложного трехрукавного пойменно-руслового разветвления между ними; В – расчленение Большой Салымской протоки и образование пойменной протоки Чебыкинской: 1 – русла рукавов; 2 – пойменные протоки; 3 – трасса судового хода в рукавах; 4 – положение рукавов (их осей)

Fig. 3. Transformation of the bifurcated channel of the Middle Ob River due to riverbank erosion at the bends of the main branches (reconstruction according to floodplain relief): A – transformation of the upper part of the Yuganskaya Ob River into a modern branch of a complex floodplain-channel branching – the Penkovskaya channel and the Pokomas floodplain branch; Б – dissection of the left branch of the bifurcated channel into the Yuganskaya Ob River and the Bolshaya Salym channel and the formation of a complex three-arm floodplain-channel branching between them; В – dissection of the Bolshaya Salym channel and the formation of the Chebykinskaya floodplain branch; 1 – channels; 2 – floodplain branches; 3 – route of the fairway in the channels; 4 – position of the channels (their axes)

стока из него, превращаются во второй основной рукав, создавая пойменно-русловое разветвление. Таково происхождение нескольких таких разветвлений на Малой Оби – левого рукава раздвоенного русла в нижнем течении р. Оби: Межьюрско-Нарыкарского длиной 21 км и Лапорско-Новинского – 9 км. Их образование (в условиях, нехарактерных для формирования такого типа разветвлений) связано с развитием крутых излучин и размывов в их привершинных частях пойменных перемычек, отделявших русло Малой Оби от текущих субпараллельно ей пойменных протоков (рис. 4). Во вновь образовавшемся Межьюрско-Нарыкарском разветвлении водность нижней части бывшей поймен-

ной Нарыкарской протоки увеличилась до 31%, и, как следствие, она превратилась в рукав пойменно-руслового разветвления. Шпора излучины Малой Оби, в вершине которой находится узел ее разветвления с Нарыкарской протокой, состоит из двух островов – Межьюр и Безымянный, представляющих собой остатки пойменных перемычек в виде островов, отделяющих Малую Обь от пойменной протоки. Это обуславливает сложную систему сосредоточения стока, в результате чего в основном рукаве Малой Оби (в нижнем крыле излучины) остается 29% расхода воды в ней, создавая вместе с переформированиями самого русла серьезные затруднения для судоходства.

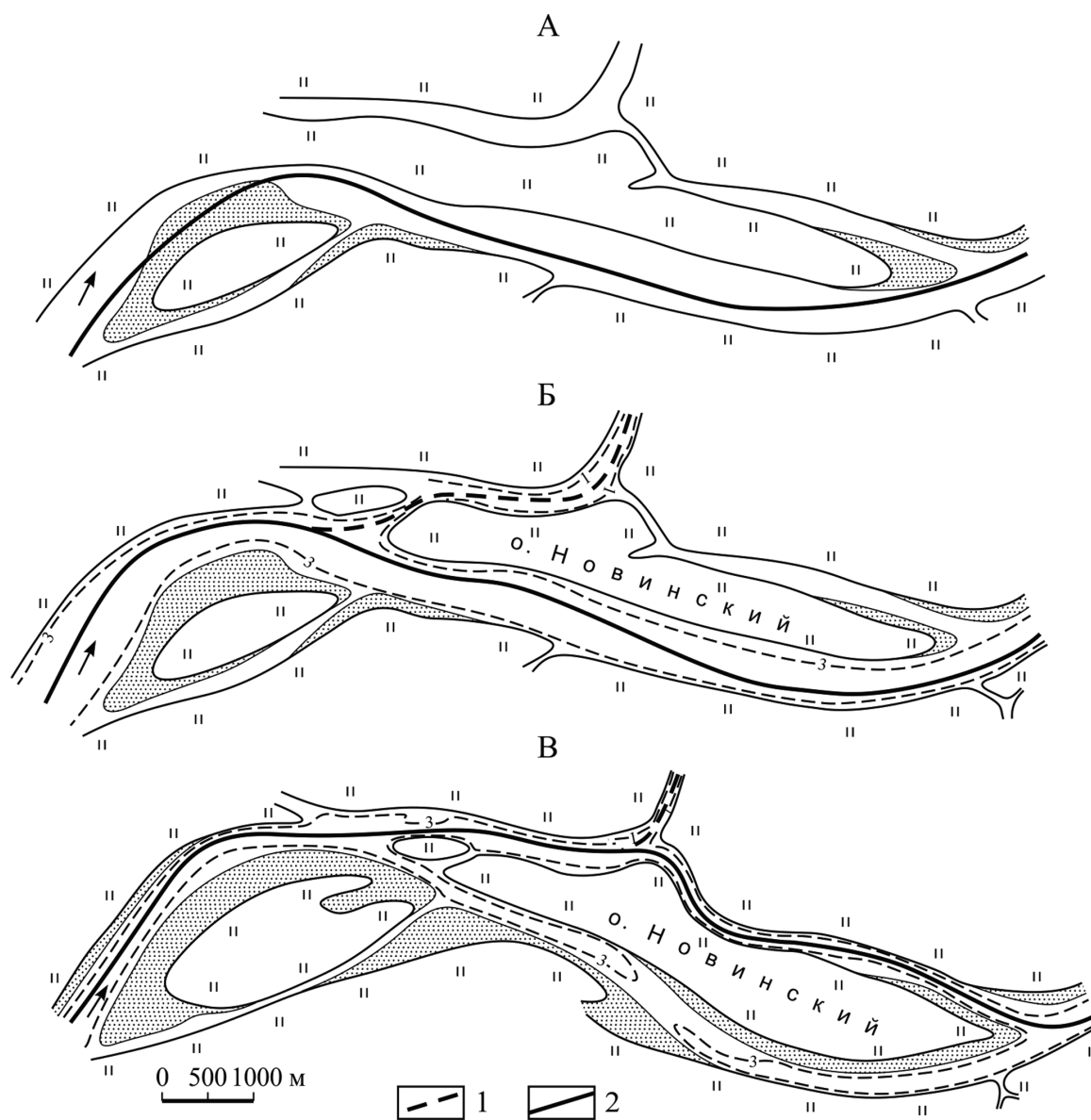


Рис. 4. Формирование Лапорско-Новинского пойменно-руслового разветвления Малой Оби: А – реконструкция на конец XIX – начало XX в.; Б – 1976 г.; В – 2014 г.; 1 – основной судовой ход; 2 – дополнительный судовой ход

Fig. 4. Formation of the Laporsko-Novinsky floodplain-channel branching of the Malaya Ob River: A – reconstruction at the end of the 19th – beginning of the 20th centuries; Б – 1976; В – 2014; 1 – main fairway; 2 – additional fairway

В Лапорско-Новинском разветвлении еще большее развитие получил левый рукав – бывшая пойменная протока, ставшая судоходной и забирающая из Малой Оби 46% ее расхода.

Ниже по течению при слиянии Малой Оби с Малой Горной Обью размыв пойменного перешейка привел к смещению узла слияния основных рукавов раздвоенного русла вверх по течению на 10 км, образованию о. Шурышкарского и пойменно-руслового разветвления, в котором левый рукав почти полностью питается водами Малой Горной Оби и лишь частично Малой Оби.

3. На реках с разветвленным руслом довольно часто перестройка рукавов связана с размывами берегов островов и расчленением их на два, реже три острова. Обычно это происходит в связи с развитием излучин одного или обоих рукавов. Вследствие этого сначала сужается остров в его средней части, а затем образуется проран, по которому начинается перераспределение стока между рукавами, приводящее к обмелению одного из них ниже прорана и активизация второго. На Северной Двине в конце XX в. выше ее слияния с Выгедой (рис. 5) был разделен пополам о. Котласский, и в левый несудоходный рукав – полый Межниковский перешло главное течение реки, в него была перенесена трасса судового хода, причем в обмелевшем бывшем судоходном рукаве (точнее его нижней части) остались акватория речного вокзала и ряд причалов речного порта. Аналогично расчленился большой о. Кенели на р. Лене в сложном трехрукавном разветвлении, что привело к окончательному обмелению нижней части левого рукава – Хайтыалахской протоки, бывшей 10–15 лет назад судоходным рукавом, перераспределению стока в центральный рукав – протоку Прямую. Выше по течению (в 10–20 км) ожидается такое же расчленение о. Баакыч, размывы которого со стороны правого рукава достигают 15–20 м/год, формируется четко выраженная вогнутость в его конфигурации. Ширина острова в этом месте в настоящее время составляет около 300 м (в 1970–1980-е гг. более 0,5 км). Таким образом, через 15–20 лет на этом участке лишь благодаря размыву берегов и расчленению островов произойдет кардинальное изменение структуры разветвлений.

4. Размывы берегов поймы, в тыловой части которой располагаются русла ее притоков, также являются нередко причиной перехвата стока главной реки или притока и возникновения сложных разветвлений. Наглядным примером этому служит средняя Обь. В районе границы Новосибирской и Томской областей у с. Батурино от нее ответвляется протока Симан длиной 42,5 км относительной водностью 30% при ширине разделяющего их пойменного массива 9 км [Русловые процессы..., 2001].

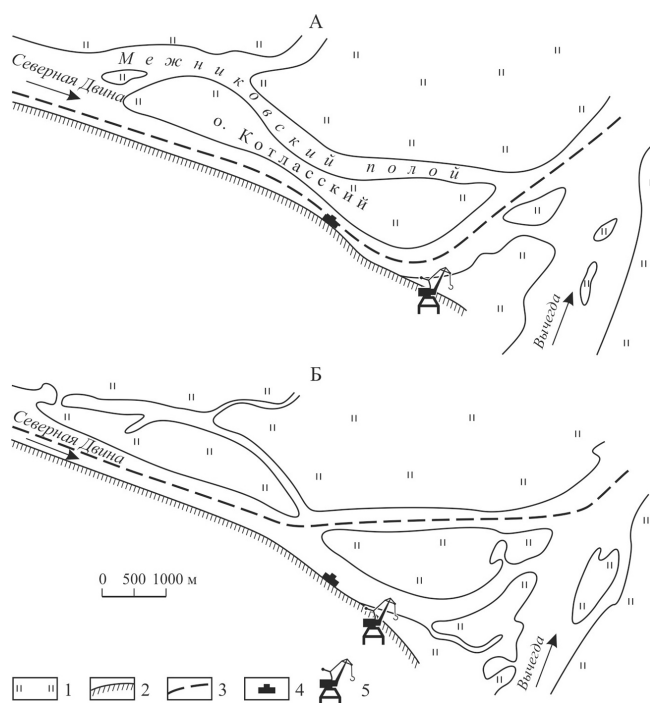


Рис. 5. Расчленение о. Котласского на р. Северной Двине из-за встречного размыва берегов в правом судоходном рукаве и левом рукаве – Межниковский полый: 1 – пойма; 2 – коренной берег; 3 – судовый ход; 4 – речной вокзал; 5 – грузовые причалы

Fig. 5. Partition of the Kotlassky Island on the Northern Dvina River due to riverbank erosion in the right navigable branch and the left branch – the Mezhnikovskaya channel: 1 – floodplain; 2 – valley side; 3 – fairway; 4 – river station; 5 – cargo berths

Образование этого рукава связано с размывами ее левого пойменного вогнутого берега, приведшее к тому, что была уничтожена пойменная перемычка между главной рекой и ее притоком – малой рекой Уень, текущей в тыловой части поймы. Размыв перемычки привел к «прорыву» обских вод в нижнюю часть Уени, русло которой углубилось, расширилось и превратилось в рукав Оби – протоку Симан. В свою очередь, в нижней части этого вновь возникшего раздвоенного участка реки размывы вогнутого берега излучины левого рукава пойменно-руслового разветвления Оби привели к отчленению нижней части пойменного массива (рис. 6), и по образовавшемуся прорану 15% расхода воды в протоке Симан возвращается в Обь.

Аналогичная ситуация сложилась в устье р. Кети, которая на протяжении нескольких десятков километров протекает в тыловой части правобережной поймы Оби. Встречные размывы берегов со стороны главной реки и притока привели к отчленению нижней части разделяющего реки пойменного массива в районе п. Нарыма и образованию на Оби пойменно-руслового разветвления, в правый рукав которого – бывшие самые низовья

р. Кети – направляется часть стока Оби. В совокупности с существующими на Оби разветвлениями русла здесь теперь находится сложный трехрукавный узел с равноценными по водности рукавами.

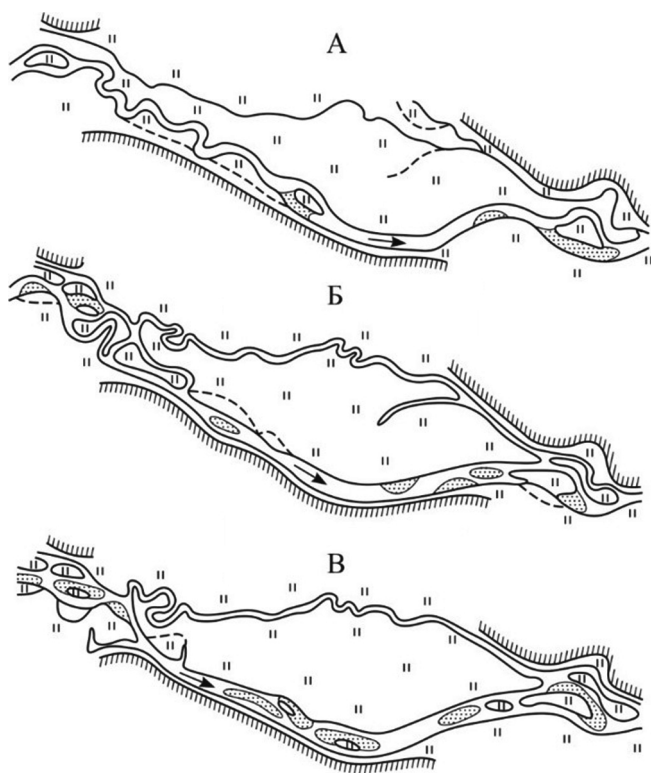


Рис. 6. Образование разветвленного русла на верхней Оби вследствие размыва поймы и переброски части стока в р. Уень – современную протоку Симан

Fig. 6. Formation of a branched channel in the Upper Ob River due to floodplain erosion and partial transfer of water runoff to the Uen River – the modern Siman channel

5. Размывы берегов в узле слияния главной реки и притока в тех случаях, когда последний, как р. Кеть, не течет в тыловой части поймы, а пересекает ее, приводит к сложной перестройке русла на устьевых участках обеих рек. При этом либо главная река через образовавшийся проран перемещается в низовья притока, либо устье последнего смещается вверх по течению, а бывший приустьевой участок притока отмирает [Чалов, Рулева, 2014]. Значительно чаще встречаются «подрезки» из-за размыва берегов устьевых участков малых рек – притоков больших рек. Остатки брошенных русел из-за происшедшего «перехвата» стока можно видеть вдоль приустьевой поймы как выше, так и ниже современного устья малой реки в виде небольших островков, отделенных серповидными в плане протоками и представляющих собой шпоры бывших излучин малой реки.

6. Меандрирования рукавов больших рек, сопровождающиеся интенсивными размывами вогнутых берегов, приводят в ряде случаев к регулярным, местами очень существенным перестройкам русла в узлах разветвлений. Так, в Саралевском разветвлении на нижней Волге за последние 100 лет развитие излучины на заходе в левый рукав – воложку Коршевитую происходило с экстремально высокими скоростями – 40–60 м/год (зафиксированы в отдельные годы 160–170 м/год [Попов, 1974]), в результате чего быстро менялась ее конфигурация, она становилась очень крутой и дважды (около 1960 и в начале 1980-х гг.) спрямлялась. Это привело к смещению захода в рукав на 6 км вверх по течению, и в последнее время «назревает» очередное спрямление из-за интенсивных размывов вогнутого берега [Чалов и др., 2019]. Если это произойдет, заход в воложку сместится еще на 4 км вверх по течению (рис. 7).

ВЫВОДЫ

Размывы пойменных берегов, являющиеся прямым следствием эволюции форм русла – излучин, разветвлений, в то же время приводят к уничтожению перемычек между крыльями крутых излучин, параллельно расположенными рукавами или руслом реки и пойменными протоками, перераспределению стока и, в конечном итоге, перестройкам русловой сети. Особенно существенные изменения при этом происходят на реках с разветвленным руслом и развитой пойменной многорукавностью. При всем многообразии подобных перестроек, вызванных размывами берегов и эволюцией форм русла, выделяются следующие их наиболее типичные схемы:

1. Меандрирование русел, их продольно-поперечное смещение и размывы вогнутых берегов излучин приводят к их искривлению, и при достижении критических значений степени развитости $l/L = 1,4-1,7$ возможно спрямление во время половодья через шпору с образованием прорванных излучин и рассредоточение стока по новому руслу и староречью.

2. Если спрямление через шпору излучины не происходит, она трансформируется в петлеобразную, в пределах которой происходит встречный размыв берегов на ее крыльях, вызывающий образование прорана между ними. В этих случаях старое русло быстро отмирает, образуя старичное озеро, а в новом формируется излучина, направление развития которой обычно иное, чем было раньше, сопровождается изменением ее положения в днище долины и интенсивными размывами берегов, особенно на первых этапах, пока форма излучин не придет в соответствие с характеристиками потока.

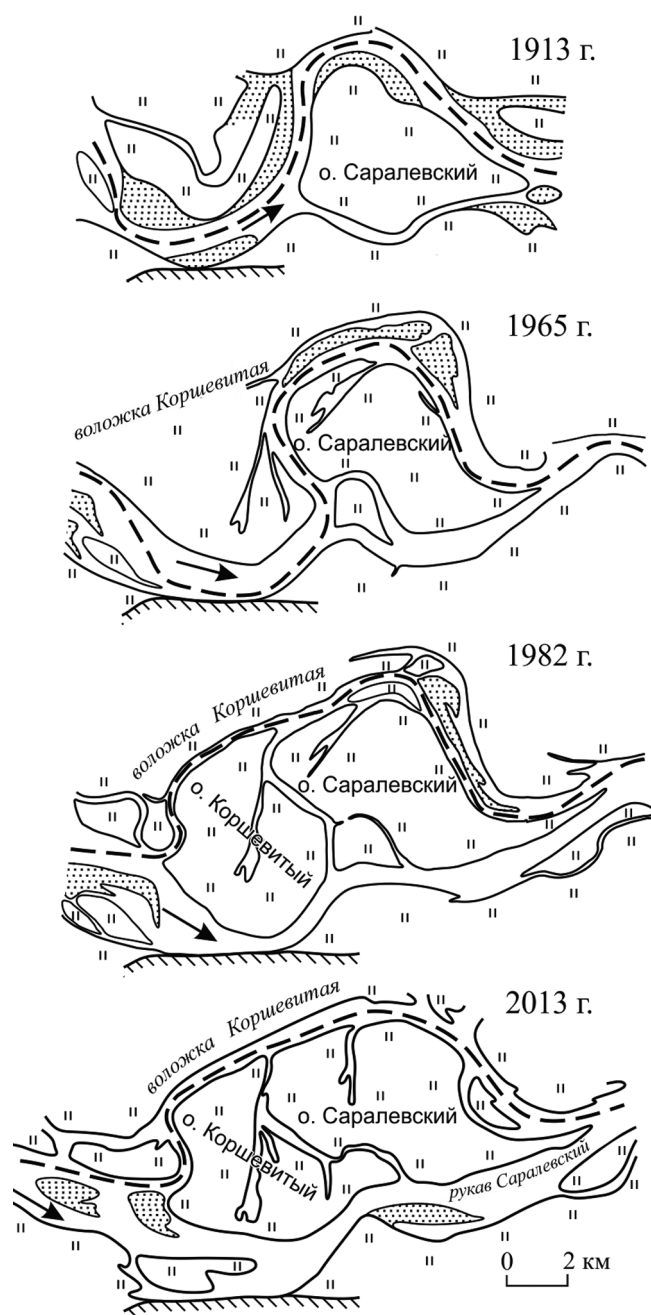


Рис. 7. Переформирование Саралевского узла разветвления русла на нижней Волге

Fig. 7. Reformation of the Saralian channel branching on the Lower Volga River

Благодарности. Выполнено по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и НИ Лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РНФ (проекты 18-17-00086 и 18-17-00086 П – переформирование русел рек, разветвление на рукава) и РФФИ (проект № 20-35-90003/20 – размывы берегов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Великанов М.А. Русловой процесс (основы теории). М.: Госфизматгиз, 1958. 395 с.
- Гарцман Б.И., Шамов В.В., Губарева Т.С. Речные системы Дальнего Востока России: четверть века исследований. Владивосток: Дальнаука, 2015. 492 с.
- Каргаполова И.Н. Реакция русел рек на изменения водности и антропогенное воздействие за последние столетия: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2006. 27 с.

Во всех случаях эволюции излучин, размывов их вогнутых берегов и спрямления из-за образования проранов через их шпору, кардинальной перестройки русла не происходит. Более разнообразны последствия размыва берегов на реках с разветвленным руслом, приводящие к существенным изменениям структуры разветвлений, ее усложнению, а иногда и к смене морфодинамического типа.

1. Размыв пойменных массивов, разделяющих рукава разветвленных русел, приводит к их расчленению, перехвату стока одних рукавов, превращению других в пойменные протоки или образованию сложных трехрукавных пойменно-русловых разветвлений.

2. Размывы вогнутых берегов излучин между основным руслом реки (или рукавом раздвоенного русла) и пойменной протокой приводит к перехвату части стока реки, превращению протоки во второй основной рукав и образованию пойменно-руслового разветвлений.

3. При размыве поймы между руслом главной реки и протекающим в тыловой части притоком – малой реки ниже образующегося прорана – русло малой реки становится многоводным, превращаясь в рукав вновь сформировавшегося раздвоенного русла. Если такой приток – достаточно крупная река, то ниже прорана формируется пойменно-русловое разветвление, а устье притока смещается вверх по течению.

4. В узлах слияния рек одного (или близкого) порядка встречные размывы берегов на каждой из них приводят к сложной перестройке устьевых участков, перехвату притоком главной реки или, наоборот, меняется вся конфигурация узла слияния вплоть до формирования сложных разветвлений русел.

5. Если рукава разветвленного русла меандрируют, то размывы берегов и образование прорванных излучин приводят к образованию трех- и четырехрукавных разветвлений с меандрирующими рукавами, образованию прорванных излучин в рукавах и регулярному перераспределению стока.

- Кондратьев Н.Е., Ляпин А.Н., Попов И.В., Пиньковский С.И., Фёдоров Н.Н., Якунин И.И. Русловой процесс. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 372 с.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.
- Куракова А.А., Чалов Р.С. Морфология русла и размыты берегов нижней Оби (в пределах ХМАО-Югры) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 6. С. 41–50.
- Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
- Назаров Н.Н., Копытов С.В., Фролова И.В., Черепанова Е.С. Русловые изменения верхней Камы в исторических документах и фольклоре // Двадцать девятое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Ульяновск: УлГПУ им. И.Н. Ульянова, 2014. С. 112–114.
- Назаров Н.Н., Егоркина С.С. Реки Пермского Прикамья: горизонтальные русловые деформации. Пермь: Звезда, 2004. 155 с.
- Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Чернов А.В. Макроизлучины рек ЕТС и проблемы палеогидрологических реконструкций // Водные ресурсы. 1992. Т. 19. № 4. С. 93–96.
- Попов И.В., Кондигерева Э.А. Прогноз русловых деформаций Волги на участке Саралевского водного узла в связи с проектированием улучшения его судоходных условий // Тр. ГГИ. 1974. № 216. С. 65–93.
- Попов И.В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 328 с.
- Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИПЭЛ плюс, 2001. 300 с.
- Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Чернов А.В., Борисова О.К., Ковалюх Н.Н. Сток воды и морфология русел рек Русской равнины в поздневалдайское время и в голоцене (по данным палеоруслового анализа) // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 12. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. С. 196–230.
- Смирнова В.Г. Гидролого-морфологический анализ разветвленных русел рек Алтайского региона: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск: ИГ СО РАН, 2002. 20 с.
- Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 232 с.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2: Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излучины. М.: Изд-во МГУ, 2004. 371 с.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Ботавин Д.В., Головлев П.П., Морозова Е.А., Сурков В.В. Покровско-Якутский водный узел на р. Лене: современные деформации и управление русловыми процессами // Изв. РАН. Сер. географ. 2019. № 6. С. 83–96.
- Чалов Р.С., Завадский А.С. Саралевский воднотранспортный узел и проблемы улучшения условий судоходства на нижней Волге // Речной транспорт (XXI век). 2019. № 4. С. 20–23.
- Чалов Р.С., Рулева С.Н. Влияние переформирования русел на развитие узлов слияния рек // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 161–168.
- Чернов А.В., Гаррисон Л.М. Палеогеографический анализ развития русловых деформаций широкопойменных рек в голоцене (на примере верхней и средней Оби) // Бюлл. МОИП. Отдел геологии. 1981. Т. 5. Вып. 4. С. 97–108.
- Knighton A.D. Fluvial Forms and Processes: A New Perspective, London, Arnold, 1998, 383 p.
- Robert A. River processes: an introduction to fluvial dynamics, London, Arnold, 2003, 214 p.
- Schumm S.A. The fluvial system, New York, Wiley, 1977, 338 p.

Поступила в редакцию 18.05.2021

После доработки 22.10.2021

Принята к публикации 09.03.2022

RIVERBANK EROSION AND EVOLUTION OF CHANNEL FORMS AS FACTORS OF RIVER CHANNEL NETWORK TRANSFORMATION

R.S. Chalov¹, A.A. Kurakova², N.M. Mihajlova³, S.N. Ruleva⁴

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

^{3,4} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes

¹ D.Sc. in Geography, Professor; e-mail: rschalov@mail.ru

² Postgraduate student; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru

³ Ph.D. in Geography, Senior Researcher; e-mail: nmmikhailova@yandex.ru

⁴ Ph.D. in Geography, Senior Researcher; e-mail: mnksl@yandex.ru

In the article we discuss basic schemes of river channel reshaping. It changes their morphodynamic type, as well as the structure of river channel network, especially on branched rivers. Riverbank erosion within channel and branch meanders leads to the formation of a passage between river channels, including branches of

bifurcated channels, and between the main channel and floodplain channels or channels of the lower reaches of tributaries (small rivers) in the rear parts of a main river floodplain. The result is the splitting of bifurcated channels, transformation of a channel into a branch or, conversely, a branch into the main channel by water interception, as well as formation of floodplain-channel branches, sometimes with three or four channels, through redistribution of water flow. Herewith unusual types of branching occur in some cases. The development of cut-off bends in meandering channels could become a key factor for the formation of a bifurcated channel and the distribution of water flow along newly formed branches. Complex changes in the structure of river channel network are characteristic of the junction points of meandering rivers. All these transformations result from the (self)-evolution of channel forms and the riverbank erosion, and do not involve changing factors of channel processes, e. g. water flow and sediment transport. This should be taken into account in paleochannel and paleohydrological reconstructions, predicting river channel deformations and designing regulation measures for water economy and water transportation projects.

Keywords: channel processes, meanders, branches, branched channel, floodplain channels, bifurcated channel, islands

Acknowledgements. The paper is prepared according to the plan of scientific research of the Department of Land Hydrology and the Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes and financially supported by the Russian Science Foundation (projects no. 18-17-00086 and 18-17-00086 II – transformation of river channels, channel branching) and the Russian Foundation of Basic Research (project no. 20-35-90003/20 – riverbank erosion).

REFERENCES

- Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovyh processov* [Geographic studies of channel processes], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1979, 232 p. (In Russian)
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, vyp. 2, Morfodinamika rechnyh rusel* [Riverbed science: theory, geography, practice, vol. 2, Morphodynamics of river channels], Moscow, KRASAND Publ., 2011, 960 p. (In Russian)
- Chalov R.S., Rulyova S.N. Vliyanie pereformirovaniy rusel na razvitie uzlov sliyaniya rek [Influence of channel reshaping on the development of river confluence nodes], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2014, no. 1, p. 161–168.
- Chalov R.S., Zavadskii A.S., Panin A.V. *Rechnye izluchiny* [River meanders], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2004, 371 p. (In Russian)
- Chalov R.S., Zavadskij A.S. Saralevskij vodnotransportnyj uzel i problemy uluchsheniya uslovij sudohodstva na nizhnej Volge [Saralevsky water transport hub and problems of improving of shipping conditions on Lower Volga], *Rechnoj transport (XXI vek)*, 2019, no. 4, p. 20–23. (In Russian)
- Chalov R.S., Zavadskij A.S., Botavin D.V., Golovlyov P.P., Morozova E.A., Surkov V.V. Pokrovsko-Yakutskij vodnyj uzel na r. Lene: sovremennye deformacii i upravlenie ruslovymi processami [Pokrovsko-Yakutsk reach of the Lena River: transformation of complex conjugated channel, recent deformations and management of channel changes], *Izv. RAN, Ser. geograf.*, 2019, no. 6, p. 83–96. (In Russian)
- Chernov A.V., Garrison L.M. Paleogeograficheskiy analiz razvitiya ruslovyh deformacij shirokopoljnykh rek v golo-cene (na primere verhnjej i srednej Obi) [Paleogeographic analysis of the development of channel deformations on wide-floodplain rivers during the Holocene (case study of the Upper and Middle Ob River)], *Byull. MOIP, Otdel geologii*, vol. 5, no. 4, 1981, p. 97–108. (In Russian)
- Garcman B.I., Shamov V.V., Gubareva T.S. *Rechnye sistemy Dal'nego Vostoka Rossii: chetvert' veka issledovanij* [River systems of the Russian Far East: quarter of a century of research], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2015, 492 p. (In Russian)
- Kargapolova I.N. *Reakciya rusel rek na izmeneniya vodnosti i antropogennoe vozdejstvie za poslednie stoletiya* [Response of river channels to changes in water discharge and anthropogenic impact over the past centuries], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2006, 27 p. (In Russian)
- Knighton A.D. *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*, London, Arnold, 1998, 383 p.
- Kondrat'ev N.E., Lyapin A.N., Popov I.V., Pin'kovskij S.I., Fyodorov N.N., Yakunin I.I. *Ruslovoj process* [Channel process], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1959, 372 p. (In Russian)
- Kondrat'ev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. *Osnovy gidromorfologicheskoy teorii ruslovogo processa* [Fundamentals of the hydromorphological theory of the channel process], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982, 272 p. (In Russian)
- Kurakova A.A. Morfologiya rusla i razmyvy beregov Nizhnej Obi (v predelakh HMAO-Yugry) [Channel morphology and bank erosion in the lower reaches of the Ob River (within the KhMAO-Yugra autonomous district)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 6, p. 41–50. (In Russian)
- Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee bassejne* [River bed and erosion in its basin], Moscow, AN SSSR Publ., 1955, 347 p. (In Russian)
- Nazarov N.N., Egorkina S.S. *Reki Permskogo Priam'ya: gorizonta'nye ruslovyje deformacii* [Rivers of the Perm Kama region: horizontal channel deformations], Perm', Zvezda Publ., 2004, 155 p. (In Russian)
- Nazarov N.N., Kopytov S.V., Frolova I.V., Cherepanova E.S. [Channel changes of the upper Kama in historical documents and folklore], *Dvadcat' devyatoe plenarnoe mezhevuz. koordinac. soveshchanie po probleme erozionnyh, ruslovyh i ust'evyh processov*, Ul'yanovsk, UIGPU im. I.N. Ul'yanova Publ., 2014, p. 112–114. (In Russian)
- Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Chernov A.V. Makroizluchiny rek ETS i problemy paleogidrologicheskikh rekonstrukcij [Macrobeds of the ETS rivers and problems of paleohydrological reconstructions], *Vodnye resursy*, 1992, vol. 19, no. 4, p. 93–96. (In Russian)

- Popov I.V. *Deformacii rechnyh rusel i gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [River channel deformations and hydraulic engineering], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965, 328 p. (In Russian)
- Popov I.V., Konditereva E.A. Prognoz ruslovyh deformacij Volgi na uchastke Saral'ovskogo vodnogo uzla v svyazi s proektirovaniem uluchsheniya ego sudohodnyh uslovij [Forecast of channel deformations of the Volga River in the section of the Saral'evskoye water hub in connection with the design of improving its navigable conditions], *Tr. GGI*, 1974, vol. 216, p. 65–93. (In Russian)
- Robert A. *River processes: an introduction to fluvial dynamics*, London, Arnold, 2003, 214 p.
- Ruslovye processy i vodnye puti na rekah Obskogo bassejna* [Channel processes and waterways on the rivers of the Ob River basin], Novosibirsk, RIPEL plus Publ., 2001, 300 p. (In Russian)
- Schumm S.A. *The fluvial system*, New York, Wiley, 1977, 338 p.
- Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Chernov A.V., Borisova O.K., Kovalyuh N.N. Stok vody i morfologiya rusel rek Russkoj ravniny v pozdnevaldajskoe vremya i v golocene (po dannym paleoruslovogo analiza) [Water Runoff and Channel Morphology of Rivers in the Russian Plain during the Late Glacial and the Holocene (by Data of Paleochannel Analysis)], *Eroziya pochv i ruslovye processy*, MSU Faculty of Geography Publ., Moscow, 2000, vol. 12, p. 196–230. (In Russian)
- Smirnova V.G. *Gidrologo-morfologicheskij analiz razvetvlennyh rusel rek Altajskogo regiona* [Hydrological and morphological analysis of the branched channels of the rivers of the Altai region], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Irkutsk, IG SO RAN Publ., 2002, 20 p. (In Russian)
- Velikanov M.A. *Ruslovoj process (osnovy teorii)* [Channel process (fundamentals of theory)], Moscow, Gosfizmatgiz Publ., 1958, 395 p. (In Russian)

Received 18.05.2021

Revised 22.10.2021

Accepted 09.03.2022

ВОЗРАСТ И СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ ЛАНДШАФТОВ КАМСКО-КЕЛЬТМИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ (БАССЕЙН ВЕРХНЕЙ КАМЫ)

Н.Н. Назаров¹, И.В. Фролова²

^{1,2} Пермский государственный национальный исследовательский университет,
кафедра физической географии и ландшафтной экологии

¹ Профессор, д-р геогр. наук; e-mail: nikolainazarovpsu@gmail.com

² Доц., канд. геогр. наук; e-mail: irvik13@gmail.com

В результате проведения комплексных палеогеографических исследований на территории Камско-Кельтминской низменности стало возможным решение вопроса о возможностях и принципах выделения реликтовых, консервативных и прогрессивных элементов ландшафта в пределах лесных и болотных геосистем бассейна верхней Камы. Важнейшими составляющими исследований стали применение методов дистанционного зондирования Земли и установление относительного и абсолютного возрастов (прямых датировок) болотных, аллювиальных и подстилающих их отложений древних водоемов. Физиономические и морфологические различия разновозрастных структур определялись степенью их устойчивости к проявлениям экзодинамических процессов и изменениям климата. Под реликтовыми элементами ландшафта (РЭЛ) следует понимать отдельные структурные единицы ландшафта (урочища, группы урочищ), в которых природные компоненты или их сочетания соответствуют природным условиям древних геосистем с периодом образования, превышающим время формирования инвариантного начала рассматриваемого ландшафта. Установлено, что их устойчивость во времени объясняется полной или частичной изолированностью от потоков вещества и энергии, воспроизводимых смежными геосистемами. Как правило, это следствие более высокого («островного») расположения таких геосистем среди других территориальных комплексов, что делает *вершинные* комплексы недоступными для геодинамических и геохимических процессов, развивающихся в пределах геосистем среднего и низкого уровней ландшафта. Консервативные элементы ландшафта (КЭЛ) и прогрессивные элементы ландшафта (ПЭЛ) в подавляющем большинстве случаев обычно тяготеют к низким и средним уровням рельефа. На самых низких его отметках находятся наиболее динамичные геосистемы – природные аквальные комплексы. Исследования показали, что выделение КЭЛ из-за их большой доли в структуре разновозрастных геосистем ландшафта невозможно по заранее установленным критериям для дифференциации самых распространенных ландшафтных элементов. Данные геосистемы определялись по остаточному принципу – как часть природных территориальных комплексов, не отвечающих критериям выделения РЭЛ и ПЭЛ. При кажущейся простоте решения данного вопроса объективность выделения таких геосистем будет зависеть от объективности выделения элементов «из прошлого» и «будущего», т. е. четкого определения границ РЭЛ и ПЭЛ.

Ключевые слова: реликтовые элементы ландшафта, пространственная структура, рельеф, лесные геосистемы, дистанционные методы, космический снимок

ВВЕДЕНИЕ

Изучение закономерностей развития природных систем в пространстве и времени является одним из самых важных и перспективных направлений современного отечественного ландшафтоведения. Важную роль в его формировании сыграло выдвинутое Б.Б. Полыновым в первой половине прошлого века положение о наличии в структуре ландшафтов *реликтовых, консервативных и прогрессивных* элементов (соответственно РЭЛ, КЭЛ, ПЭЛ), представляющих морфологические, биотические, аквальные и другие проявления стадийности в развитии геосистем, которые и составляют структуру современного ландшафта [Полынов, 1925, 1952]. На множестве примеров, опирающихся главным образом на результаты изучения лесостепных и степ-

ных ландшафтов России и смежных территорий, ведущими физико-географами уже в конце прошлого и начале нынешнего столетий выделено местоположение реликтовых элементов в составе геосистем и разработана их типизация [Николаев, 1976; Мильков, 1989; Исаченко, 1991]. В значительно меньшей степени исследования коснулись места и роли консервативных и прогрессивных элементов в современном развитии ландшафта [Александровский, 2004; Александровский, Гласко, 2014; Назаров и др., 2016].

Анализ работ по данной тематике показывает, что пока не произошло значительного продвижения и в решении вопроса о причинах и энергетике процессов перехода количественных изменений структуры РЭЛ, КЭЛ и ПЭЛ в их качественные измене-

ния. Также не наблюдается заметных результатов решения проблемы механизмов развития смежных (каскадных) геосистем, осуществляющих последовательно передачу вещества и энергии от одной структурной единицы ландшафта к другой. Вопросы, на которые пока так и не получено однозначных ответов, касаются и понимания того, при каком соотношении РЭЛ, КЭЛ и ПЭЛ будет меняться степень устойчивости ландшафта к определенным видам антропогенного воздействия. Пока не понятно, как и в каком направлении (с каким знаком) меняется устойчивость ландшафта в связи с происходящими изменениями климатической и/или сейсмической обстановки. До настоящего времени не существует наработок, касающихся изучения *долговечности* и *скорости старения* геосистем, по результатам которых возможно прогнозирование перестройки структуры ландшафта.

Отсутствие для таежного Пермского Прикамья научно-исследовательских работ подобного плана

и при этом появление в последние десятилетия новых данных о палеогеоморфологических обстановках в бассейне верхней Камы [Назаров и др., 2015; Назаров, 2017; Назаров, Копытов, 2019а, 2019б] сделали возможными исследования развития геосистем и геодинамической устойчивости элементов ландшафта на этой территории.

Модельным участком, состоящим из разновозрастных структурных элементов, была выбрана Камско-Кельтминская низменность – крупнейшее по площади территории сочетание болотных, аллювиально-озерных и золовых геосистем на севере Пермского края (рис. 1). Относительно хорошая палеогеографическая изученность этой части Прикамья дает основание для прогнозирования направленности развития ландшафта на кратко- и среднесрочную перспективу, задействовав при этом логику переходов его структурных частей от прогрессивных через консервативные к реликтовым.

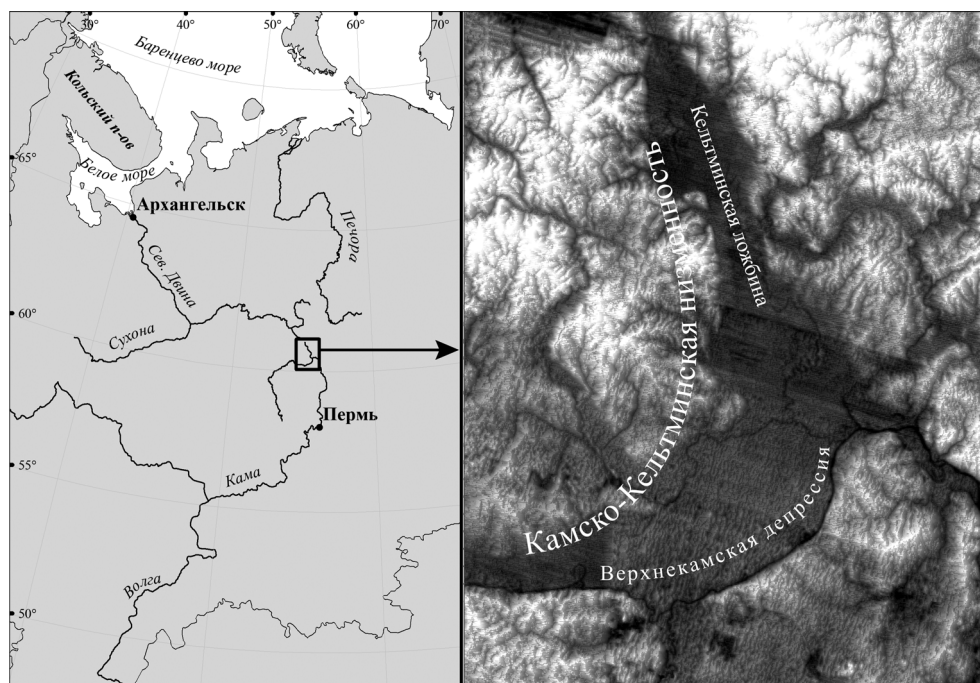


Рис. 1. Камско-Кельтминская низменность

Fig. 1. The Kama-Keltma lowland

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Камско-Кельтминская низменность (ККН) представляет собой подковообразное понижение рельефа, самые низкие отметки которого формируют поймы Камы и Южной Кельтмы. Наиболее широкая часть Камской долины соответствует положению Верхнекамской депрессии, являющейся крупнейшей неотектонической структурой на се-

вере Пермского края. Примыкающее к ней с востока и уходящее на север заболоченное понижение – Кельтминская ложбина – является фрагментом древней долины пра-Камы, направлявшей свои воды в бассейны Вычегды – Северной Двины. Начиная с раннего валдая, более поздней стадии развития, палеодолина исполняла функцию спиллвея. Через южную часть Кельтминской ложбины происходил сброс «лишних» вод из подпрудно-ледниковых озер

бассейна Вычегды в бассейн Камы [Квасов, 1975; Лавров, Потапенко, 2005; Lysa et al., 2014; Larsen et al., 2014; Назаров, 2017]. По данным результатов исследований возраста пойменных генераций Камы и древней русловой сети в самой широкой части низменности последняя перестройка структуры местной гидросети началась относительно недавно – 2–3 тыс. л. н. и, по всей видимости, начала снижать свою активность только в последние столетия [Назаров, 2014].

Геосистемы Камско-Кельтминской низменности (кроме пойменных комплексов Камы, Южной Кельтмы и относительно небольших транзитных и малых болотных рек) представлены верховы-

ми болотами и озерами (среди них крупнейшие в Пермском Прикамье озера Большой Кумикуш, Новожилово, Нахты и др.). Заметную роль в геосистемном строении низменности играют песчаные массивы олового происхождения, покрытые сосновыми лесами. Крупнейшей мезоформой рельефа олового происхождения является песчаный шлейф, протянувшийся с запада на восток почти на 25 км (рис. 2).

Основной массив информации, задействованной для получения данных о структуре рисунка современных геосистем, составили результаты дешифрирования космических снимков, полученных со спутника Landsat-8 OLI с разрешением 30 м.

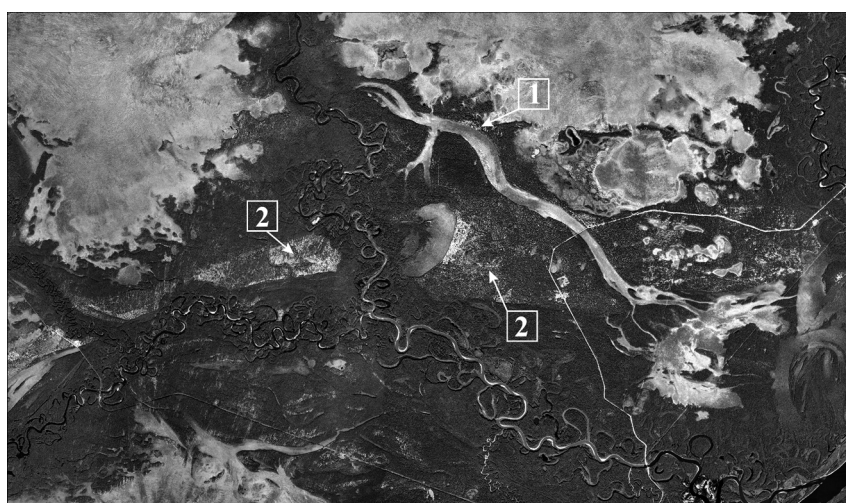


Рис. 2. Большая террасовая ложбина (1) и оловый шлейф (2)

Fig. 2. Large terrace hollow (1) and eolian apron (2)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Критерии выделения реликтовых, консервативных и прогрессивных элементов ландшафта.

Отмечая наличие определенного прогресса в изучении реликтовых элементов ландшафтов в последние десятилетия, необходимо указать на нерешенность целого ряда вопросов, касающихся выбора критериев их выделения и принципов проведения данной процедуры. До настоящего времени так и не сформировалось единого мнения о количестве природных компонентов и частей исследуемой геосистемы, которые должны обладать «реликтовостью», чтобы весь природный территориальный комплекс можно было отнести к реликтовому [Бережной, 1997; Ростов, 1997]. Нет понимания по вопросу: достаточно ли только присутствия древней растительности для отнесения ее к реликтовой без уточнения времени формирования рельефа, почвы и других компонентов геосистемы? Другим

обстоятельством, также не позволяющим сегодня на практике приступить к выделению реликтовых геосистем будучи уверенными в объективности результатов такой дифференциации, является опыт проведения таких исследований преимущественно на примерах исключительно степных и лесостепных ландшафтов. В них высокие отметки рельефа совершенно ожидаемо и по понятным причинам совпадают с «островным» местоположением урочищ, на которых в силу особых условий, сложившихся на современном этапе развития ландшафта (непригодность для сельскохозяйственной обработки, повышенная увлажненность и др.), сохранились фитоценозы предыдущих эпох [Карамышева, Рачковская, 1973; Горчаковский, 1987; Еремеева, Леонова, 2018; Хорошев, 2021]. Менее определенная ситуация складывается в изучении ландшафтов лесной зоны. Нарботки по выделению РЭЛ, в которых критерием отнесения к реликтовым является растительность, фактически отсутствуют. По на-

шему мнению, причиной такого ограниченного интереса со стороны исследователей к реликтовым элементам в лесных ландшафтах, по-видимому, является отсутствие легко выявляемой связи между высотной дифференциацией рельефа и видовым составом растительности, что, естественно, затрудняет сам поиск и выделение представителей фитоценозов древних эпох (в отличие от лесостепных и степных ландшафтов).

Приступая к обоснованию критериев выделения РЭЛ, КЭЛ и ПЭЛ, необходимо определиться с родовыми признаками таких геосистем: что следует понимать под этими природными комплексами и где проходит граница между «прошлым», «настоящим» и «будущим».

Рассмотрение вопроса о заполняемости современных ландшафтов разновозрастными структурами целесообразно начать с самых древних, сохранность которых обеспечивается их высокой степенью устойчивости к проявлениям экзодинамических процессов и климатических флуктуаций последующих эпох. По нашему мнению, под РЭЛ следует понимать отдельные структурные единицы ландшафта (урочища, группы урочищ), в которых природные компоненты или их сочетания соответствуют природным условиям древних геосистем с периодом образования, превышающим время формирования инвариантного начала рассматриваемого ландшафта.

При поиске и выделении РЭЛ главным компонентом для лесных ландшафтов, так же как и для ландшафтов, испытывающих дефицит увлажнения, является рельеф земной поверхности. Объясняется это тем, что при каждом его изменении, связанном с активной («быстрой») денудацией или аккумуляцией, как правило, начинается новый отсчет времени для формирующихся на нем почв и растительных сообществ. Под изменениями рельефа следует понимать не только формирование его новых поверхностей (граней) в результате деятельности геодинамических процессов, но и изменение их относительной высоты (например, связанное с переуглублением дренажной системы или, напротив, ее заполнением наносами), что вызывает изменение уровня грунтовых вод, увлажненности почв и сукцессионные изменения растительности. В итоге результатом является зарождение и формирование новой геосистемы.

Вопрос о причинах сохранения РЭЛ в современных ландшафтах по прошествии длительного времени, в течение которого происходили «качественные» изменения природных условий, сегодня в основном можно считать решенным. В первую очередь устойчивость РЭЛ во времени можно объяснить их полной или частичной изолированностью

от потоков вещества и энергии, воспроизводимых смежными геосистемами. В большинстве случаев это следствие более высокого («островного») расположения таких геосистем среди других территориальных комплексов, что делает *вершинные* комплексы недоступными для геодинамических и геохимических процессов, развивающихся в пределах геосистем среднего и низкого уровней ландшафта.

В подавляющем большинстве случаев именно на средних и низких отметках рельефа располагаются прогрессивные и консервативные элементы ландшафта. Обычно в пределах наинизшего уровня находятся и самые динамичные геосистемы – природные аквальные комплексы. Перманентно обновляясь в результате деятельности эрозионно-аккумулятивных процессов, развивающихся непосредственно в них самих, аквальные системы являются мощным катализатором различных воздействий на смежные с ними структурные элементы ландшафта. Изменение уровней водоема или живой силы водотока, которые случаются периодически даже при относительно стабильной климатической обстановке, приводит или к «переработке» приграничной геосистемы – результат абразионного или эрозионного воздействия, или, напротив, к образованию новых структурных элементов – аккумулятивных равнин на месте бывших мелководий. Эти же геодинамические процессы при *смене* климата делают характер обновления ландшафта более выраженным и направленным. В качестве результатов таких процессов выступают зарождение и развитие ПЭЛ, в одном случае увеличивающих свою площадь за счет смежных геосистем, а в другом – за счет аквального комплекса.

Выделение КЭЛ из-за их большой доли в структуре разновозрастных геосистем ландшафта по определению не может представлять собой процесс, включающий применение заранее установленных критериев для дифференциации самых распространенных элементов в пространстве. Данные геосистемы, по всей видимости, могут быть определены лишь по остаточному принципу, как сумма природных территориальных комплексов, не отвечающих критериям выделения РЭЛ и ПЭЛ. При кажущейся простоте решения данного вопроса объективность выделения этой части ландшафта будет целиком и полностью зависеть от объективности выделения элементов «из прошлого» и «будущего» – четкого определения границ РЭЛ и ПЭЛ.

Особый случай в воспроизводстве ПЭЛ представляют болотные комплексы и, в частности, массивы верховых (торфяных) болот. Без жесткой привязки к аквальным геосистемам их развитие и экспансия на смежные природные системы про-

исходит не только в пределах низких отметок рельефа, но и на средних и даже высоких уровнях равнинных территорий. Если экзодинамическое воздействие аквальных систем на смежные структурные элементы ландшафта заключается в «переработке» последних эрозионными (абразионными, оползневыми) процессами при одновременном «воспроизводстве» новых геосистем, но с более низкими отметками рельефа (поймы, абразионной террасы), то ландшафтоформирующая роль болотных комплексов заключается не в формировании нового уровня, а в расширении площади торфяного массива за счет смежных элементов ландшафта с пологими склонами. Способность *саморазвития* верховых болот является важнейшей движущей силой, позволяющей им функционировать в широком диапазоне природных условий и на протяжении длительного времени. Относительно небольшие скорости расширения внешних границ болотного массива, достигающие 7–15 см в год [Глебов, Джансеитов, 1983; Нейштадт, 1977] при общей продолжительности процесса торфообразования не менее 5–6 последних тысячелетий [Сукачев, 1973], дают основание для отнесения большей части верховых болот к устойчивым развивающимся геосистемам – ПЭЛ. Исключение составляют участки верховых болот, где под воздействием внешних сил резко меняется направленность их развития. В пределах торфяных геосистем, где нарастание толщи торфа является естественным процессом, с определенного момента начинают превалировать другие процессы. Как результат, на части массива торфообразование прекращается, происходит его постепенное залесение с активизацией почвообразовательных процессов: болота превращаются в рямы – сосново-кустарничково-сфагновые геосистемы. Довольно часто их формирование является результатом воздействия антропогенных процессов, среди которых основную долю составляют высокие скорости поступления минерального вещества (наносов) с прилегающих к болоту водоразделов или строительство дренажных систем (рис. 3).

Особое место в структуре разновозрастных элементов ландшафта занимают геосистемы переходного типа, под которыми следует понимать ограниченные по площади участки территорий с высокой скоростью протекания природных процессов, меняющих направленность своего развития в течение короткого периода [Хорошев, 2021]. К таким процессам относятся режим увлажнения, накопление и изъятие наносов, сукцессии растительности. Типичным примером такой нестабильной во времени геосистемы может считаться низкая пойма (для Камы – первая генерация поймы), на поверхности которой практически ежегодно происхо-

дит накопление или удаление пойменного наилка (пойменной фации наносов), а продолжительность ее существования как отдельного геоморфологического элемента пойменного массива зависит от скорости бокового смещения русла. Для небольшой широкопойменной реки геосистемы переходного типа в поперечнике могут составлять десятки метров. Для верхнего течения Камы размеры первой генерации в пределах ККН достигают сотен метров.

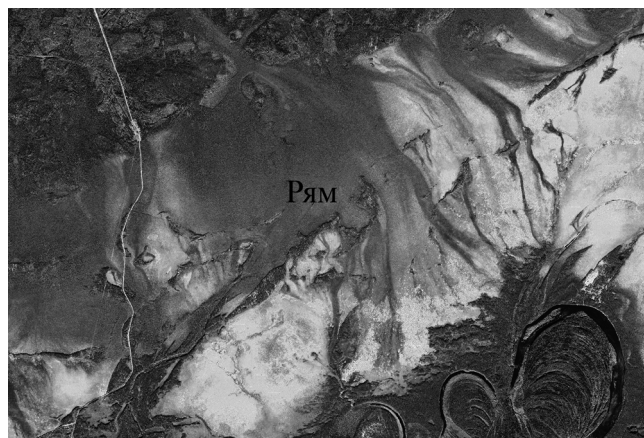


Рис. 3. Формирование рьяма

Fig. 3. Formation of a rjam

Исходя из общей картины формирования рельефа ККН и последовательности закрепления ландшафтных урочищ в структуре геосистемы, определение стадий их развития представляет собой несложную процедуру, но имеющую важное значение для понимания пределов устойчивости ландшафта в целом (табл.).

Структура разновозрастных элементов Камско-Кельтминской низменности. Типизация структурных элементов ландшафта ККН по стадиям их развития может быть реализована на ландшафтно-геоморфологической основе (рис. 4). В каждом ландшафтно-геоморфологическом выделе (геоморфосистеме) характер и особенности биотических и почвенных компонентов имеют четкую привязку к границам этих образований. Так, на незаболоченных участках первой надпойменной террасы Камы и аллювиально-озерной террасы Кельтминской ложбины обычно встречается набор урочищ, представленных лесными сообществами из светлохвойных и темнохвойных пород деревьев с моховым покровом. Возвышающиеся над основным уровнем этих террас валлообразные и бугристые поверхности, как правило, осложнены золовым микрорельефом, на котором произрастают разреженные белошнуровые сосняки. Сфагновые верховые болота, занимающие около 80% Верхнекамской депрессии и около 50% в Кельтминской ложбине, представляют собой геокомплексы, отличающиеся высокой динамикой

саморазвития, сопровождающейся определенной «агрессией» по отношению к смежным геосистемам. Высокие скорости прироста биомассы сфагнового мха подтверждаются изменениями структуры фаций, обычно происходящими вскоре после возведения гати (лежневки) через болотный массив (рис. 5). С разных ее сторон структура мохового покрытия,

как правило, различается. Связано это с расположением данного сооружения (порога) на пути перемещения (горизонтального растекания) верхнего горизонта молодого торфа от центра (центров) к периферии болота. По имеющимся данным, скорость годового прироста сфагноума в бассейне верхней Камы в таких точках достигает 1,3–1,6 см [Генкель, 1974].

Таблица

Стадии развития элементов ландшафта Камско-Кельтминской низменности

Стадия развития	Верхнекамская депрессия	Кельтминская ложбина
ПЭЛ	1. Верховые и переходные болота. 2. Вторая – шестая пойменные генерации Камы	1. Верховые и переходные болота
КЭЛ	1. Болотный рям (сосново-кустарничково-сфагновое болото). 2. Первая надпойменная терраса Камы	1. Болотный рям (сосново-кустарничково-сфагновое болото). 2. Надпойменные террасы Южной Кельтмы. 3. Аллювиально-озерная терраса, в прибортовой части, осложненная конусами выноса и шлейфами пролювия
РЭЛ	1. Локальные возвышения рельефа (валы, бугры) на первой надпойменной террасе. 2. Озера	1. Локальные возвышения рельефа (валы, бугры) на аллювиально-озерной террасе. 2. Озера
ГПТ	1. Первая пойменная генерация Камы и пойма р. Тимшер	1. Низкая пойма рек Южная Кельтма и Пильва

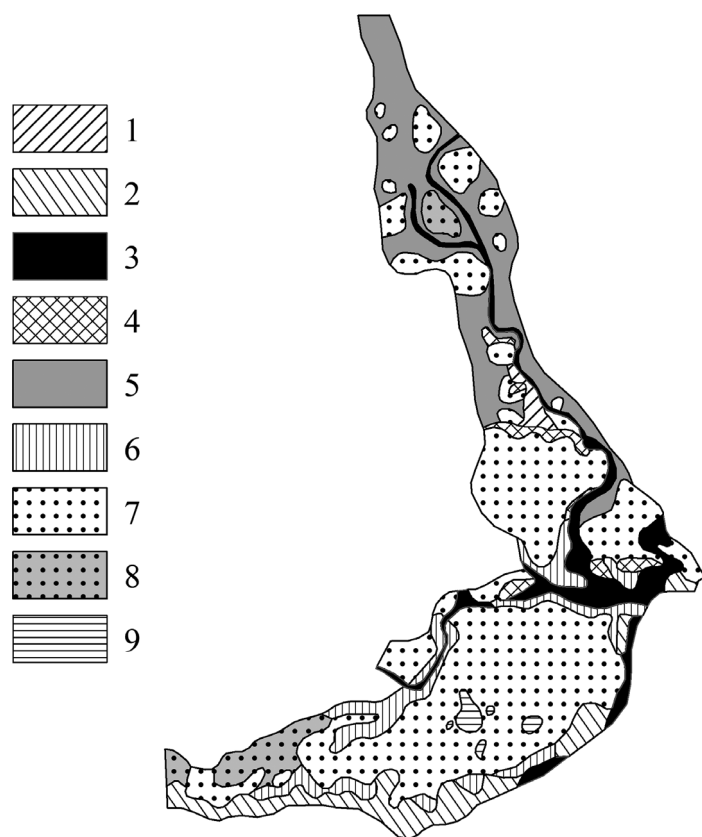


Рис. 4. Ландшафтно-геоморфологическая схема Камско-Кельтминской низменности:

- 1 – надпойменные террасы р. Южной Кельтмы;
- 2 – пойменные генерации Камы (вторая – шестая);
- 3 – низкая пойма р. Южной Кельтмы и первая пойменная генерация Камы;
- 4 – остаточные массивы (валы первой надпойменной террасы Камы и аллювиально-озерной террасы);
- 5 – аллювиально-озерная терраса;
- 6 – первая надпойменная терраса Камы;
- 7 – верховые и переходные болота;
- 8 – болотный рям;
- 9 – озера

Fig. 4. Landscape-geomorphologic scheme of the Kama-Keltma lowland:

- 1 – fluvial terraces of the South Keltma River;
- 2 – floodplain generations of the Kama River (second – sixth);
- 3 – low floodplain of the South Keltma River and the first floodplain generation of the Kama River;
- 4 – residual massifs (shafts of the first fluvial terraces of the Kama River and alluvial-lake terrace);
- 5 – alluvial-lake terrace;
- 6 – the first fluvial terrace of the Kama River;
- 7 – raised swamps and transitional bogs;
- 8 – bog rjam;
- 9 – lakes

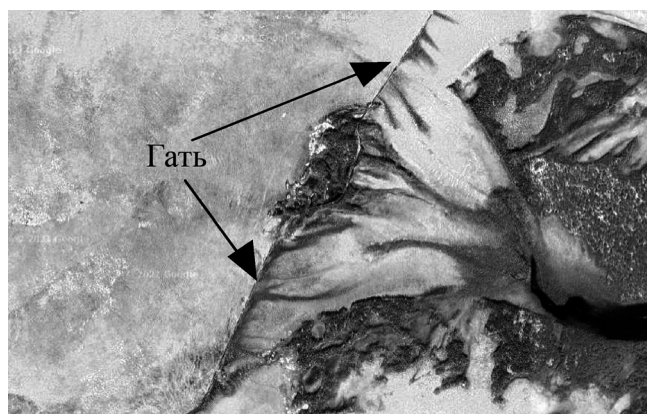


Рис. 5. Изменение структуры болотных фаций с разных сторон гати (космический снимок)

Fig. 5. Change in the structure of bog facies from different sides of a log-road (satellite image)

Другим примером активного саморазвития сфагнового болота, но уже с противоположным эффектом является формирование болотного ряма на участках активного поступления наносов с окружающих водоразделов. Причиной формирования сосново-кустарничково-сфагнового болота может являться также резкое понижение уровня грунтовых вод в результате строительства дренажных систем. В естественных условиях переход сфагнового верхового болота в стадию ряма происходит по мере углубления русла реки, близлежащей к болотному массиву.

Все пойменные генерации за исключением самой молодой (первой) в зависимости от уровня грунтовых вод и особенностей микрорельефа (наличие грив и межгривных понижений) чаще всего составляют лесные урочища, иногда разделенные низинными болотами. Особый состав растительности характерен именно для первой генерации Камы и низкой поймы Южной Кельтмы и Пильвы. Здесь древесные породы и кустарники обычно представлены влаголюбивой ольхой и ивой с вейником в нижнем ярусе. Пограничное положение с руслом реки занимают фации прибрежных отмелей, занятые временной травянисто-кустарниковой растительностью. Периодическое затопление и смена процесса аккумуляции наносов их размывом и удалением делает данную часть поймы наименее стабильным геоморфологическим образованием, характеризующимся неопределенностью своего развития и существования в пространстве и времени.

Выделение в ландшафтной структуре ККН геосистем, относящихся к определенным стадиям своего развития, позволяет увидеть и оценить траекторию развития как ландшафта в целом, так и отдельных его частей (рис. 6). Наличие крупного водотока – Камы в пределах Верхнекамской депрессии с ее повышенной неотектонической актив-

ностью объясняет преобладание ПЭЛ в структуре разновозрастных геосистем и сохранение тенденции их «омоложения» в среднесрочной перспективе. Напротив, в Кельтминской ложбине наблюдается прева-лирование КЭЛ, особенно в северной и центральной ее частях, что не предполагает смены направленности ландшафтогенеза в ближайшем будущем.

Для обеих частей Камско-Кельтминской низменности главными геосистемами, осуществляющими активное геодинамическое моделирование ее поверхности, являются верховые сфагновые болота. Основной тренд морфолито-генеза в ее ландшафте – это расширение площади торфяных массивов и постепенное поглощение островков минерального грунта. Причиной сохранения подобного развития геосистемы на среднесрочную перспективу (до конца XXI в.) является повышение средней температуры на всей территории бассейна верхней Камы, одновременно сопровождаемое увеличением доли осадков в жидком виде [Прогноз..., 2008;

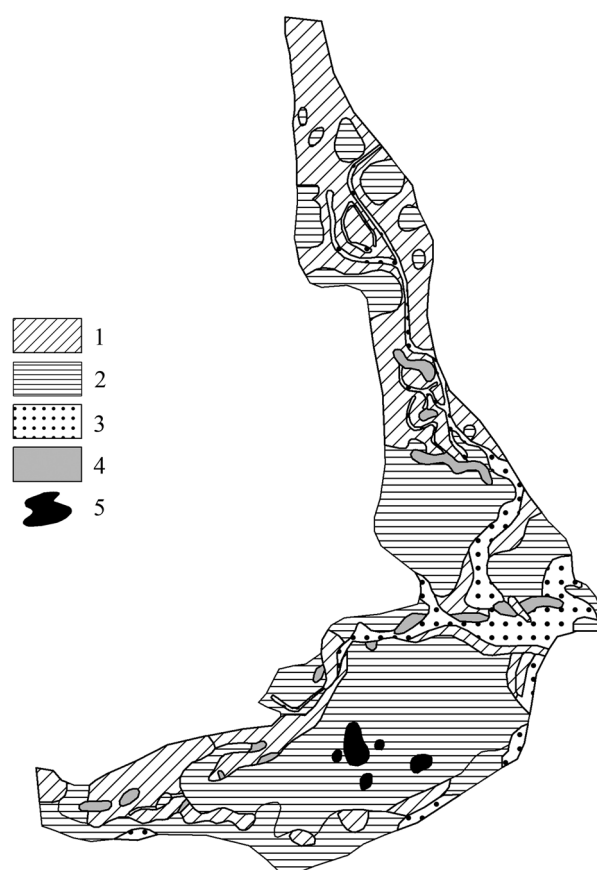


Рис. 6. Разновозрастные элементы ландшафта Камско-Кельтминской низменности:

1 – КЭЛ; 2 – ПЭЛ; 3 – ГПТ; 4 – РЭЛ; 5 – озера

Fig. 6. Landscape elements of different ages within the Kama-Keltma lowland:

1 – conservative landscape elements; 2 – progressive landscape elements; 3 – transitional geosystems; 4 – relic landscape elements; 5 – lakes

Калинин, 2019]. Подобный ход климатических изменений, безусловно, окажет соответствующее воздействие на активность торфообразования и увеличение скорости расширения площади болот.

Характеризуя геосистемы, относящиеся к КЭЛ, необходимо остановиться на особых чертах части природных компонентов, отличающих их от геосистем других стадий развития ландшафта. От ПЭЛ их отличает наличие развитой почвы, свидетельствующее о значительной продолжительности существования данных урочищ и отсутствии активного и непосредственного влияния на них со стороны смежных геосистем. К таким образованиям относятся незначительные по площади фрагменты надпойменных террас Камы и Южной Кельтмы, а также аллювиально-озерная терраса, занимающая значительное место в структуре геосистем Кельтминской ложбины.

При рассмотрении РЭЛ следует отметить их расположение как на самых высоких, так и на самых низких отметках рельефа ККН. Высокие отметки относятся к эрозионно-аккумулятивным формам на относительно ровных поверхностях террас. Образованные древними водотоками валлообразные поверхности позднее были моделированы эоловыми процессами и к настоящему моменту из-за своего положения не подвергаются какому-либо воздействию со стороны смежных геосистем. Сохранность от воздействия геодинамических процессов поддерживается высокой степенью их залесенности и относительно небольшими размерами, что препятствует формированию временных водотоков, обладающих значительной эродирующей силой. РЭЛ низких отметок рельефа представляют

мелководные остаточные озера, время образования которых сопоставимо со временем формирования первой надпойменной террасы Камы.

ВЫВОДЫ

Как в лесостепных и степных ландшафтах, расположение реликтовых геосистем в лесной зоне также соответствует вершинным комплексам, а особенности рельефа являются главным регулятором сохранения (консервации) или перманентного изменения (развития, разрушения) природных территориальных комплексов. Объясняется это изолированностью вершинных геосистем от потоков вещества и энергии, воспроизводимых смежными геосистемами.

Прогрессивные и консервативные элементы ландшафта в подавляющем большинстве случаев обычно тяготеют к низким и средним отметкам рельефа. К ним приурочена большая часть верховых болот, относящихся к активно развивающимся природным комплексам. В пределах самого низкого уровня находятся и наиболее динамичные геосистемы – природные аквальные комплексы.

Разная направленность и скорость развития структурных элементов Верхнекамской депрессии и Кельтминской ложбины как частей Камско-Кельтминской низменности определяются разной историей ландшафтогенеза и наличием активно развивающихся пойменно-руслых комплексов Камы. В Верхнекамской депрессии ведущей тенденцией становится последовательное увеличение доли прогрессивных элементов ландшафта, в Кельтминской ложбине – сохранение ведущей роли консервативных элементов при сохранении и устойчивости положения реликтовых геосистем.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00276.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александровский А.Л. Этапы и скорости развития почв в поймах рек Русской равнины // Почвоведение. 2004. № 11. С. 1285–1295.
- Александровский А.Л., Гласко М.П. Взаимодействие аллювиальных и почвообразовательных процессов на разных этапах формирования пойм равнинных рек в голоцене (на примере рек центральной части Восточно-Европейской равнины) // Геоморфология. 2014. № 4. С. 3–17.
- Генкель А.А. Болота Пермской области // Уч. зап. Перм. ун-та. Биogeография и краеведение. 1974. Т. 131. Вып. 2. С. 4–85.
- Глебов Ф.З., Джансеитов К.К. О скорости заболачивания Западно-Сибирской равнины // География и природные ресурсы. 1983. № 3. С. 144–146.
- Горчаковский П.Л. Лесные оазисы Казахского мелкосопочника. М.: Наука, 1987. 158 с.
- Еремеева Е.А., Леонова Н.Б. Реликтовые сообщества островных сосновых лесов в ландшафтах Евразийских степей // Степи Северной Евразии: материалы VIII Международного симпозиума. Оренбург, 2018. С. 375–378.
- Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 336 с.
- Калинин Н.А. Условия формирования и прогноз сильных осадков с помощью индексов неустойчивости атмосферы на территории Уральского Прикамья // Географический вестник. 2019. № 4(51). С. 96–112. DOI: 10.17072/2079-7877-2019-4-96-112.
- Карамышева З.В., Рачковская Е.И. Ботаническая география степной части Центрального Казахстана. Л.: Наука, 1973. 250 с.

- Квасов Д.Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Наука, 1975. 280 с.
- Лавров А.С., Потапенко Л.М. Неоплейстоцен северо-востока Русской равнины. М.: Аэрогеология, 2005. 348 с.
- Милюков Ф.Н. Проблема реликтов в физической географии // Известия АН СССР. Серия географическая. 1989. № 6. С. 5–17.
- Назаров Н.Н. К вопросу о времени последнего массового спрямления излучин на верхней Каме // Вестн. Удмуртского ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2014. Вып. 2. С. 105–111.
- Назаров Н.Н. Плейстоценовые перестройки речных русел и современное развитие пойменно-русловых комплексов верхней Камы // Геоморфология. 2017. № 3. С. 88–100. DOI: 10.7868/S0435428117030087.
- Назаров Н.Н., Копытов С.В. Реконструкция этапов развития Кельтминской ложбины по геоморфологическим данным (Предуралье) // География и природные ресурсы. 2019а. № 3. С. 154–164. DOI: 10.21782/GIPR026-1619-2019-3(154-164).
- Назаров Н.Н., Копытов С.В. Использование данных дистанционного зондирования в изучении перестроек речной сети (на примере верхней Камы) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019б. Т. 16. № 1. С. 105–117. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-105-117.
- Назаров Н.Н., Копытов С.В., Чернов А.В. К вопросу о возрасте пойм прерывисто-динамического развития (на примере верхней Камы) // Географический вестник. 2016. № 3(38). С. 15–27.
- Назаров Н.Н., Чернов А.В., Копытов С.В. Перестройки речной сети Северного Предуралья в позднем плейстоцене и голоцене // Географический вестник. 2015. № 3(34). С. 26–34.
- Нейштадт М.И. Возникновение и скорость развития процесса заболачивания // Научные предпосылки освоения болот Западной Сибири. М.: Наука, 1977. С. 39–47.
- Николаев В.А. О возрасте ландшафтов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1976. № 2. С. 45–55.
- Полынов Б.Б. Ландшафт и почва // Природа. 1925. № 1–3. С. 73–84.
- Полынов Б.Б. Географические работы. М.: Географгиз, 1952. 400 с.
- Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: МАКС Пресс, 2008. 292 с.
- Ростом Г.Р. Реликтовые ландшафты в лесостепной зоне Восточно-Европейской равнины // Степи Северной Евразии: сохранение природного разнообразия и мониторинг состояния экосистем: материалы I Международного симпозиума. Оренбург, 1997. С. 39–40.
- Сукачев В.Н. Избранные труды в трех томах / под ред. Е.М. Лавренко. Т. 2: Проблемы болотоведения, палеоботаники и палеогеографии. Л.: Наука, 1973. 352 с.
- Хорошев А.В. Ландшафтные условия стабильности фитопродукционного функционирования в Айтуарской степи (Южный Урал) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 2. С. 82–91.
- Lysa A., Larsen E., Buylaert J.-P., Fredin O., Jensen M., Kuznetsov D. Late Pleistocene stratigraphy, and sedimentary environments of the Severnaya Dvina-Vychegda region in northwestern Russia, *Boreas*, 2014, vol. 43, p. 759–779.
- Larsen E., Fredin O., Jensen M., Kuznetsov D., Lysa A., Subetto D. Subglacial sediment, proglacial lake-level and topographic controls on ice extent and lobe geometries during the Last Glacial Maximum in NW Russia, *Quaternary Science Reviews*, 2014, vol. 92, p. 369–387.

Электронные ресурсы

Бережной А.В. Реликтовые ландшафтные комплексы и их разнообразие в степях Русской равнины // Степи Северной Евразии: материалы I Международного симпозиума. Оренбург, 1997. URL: <http://orensteppe.org/content/reliktovye-landshaftnye-kompleksy-i-ih-raznootobrazie-v-stepyah-russkoy-ravniny> (дата обращения 16.07.2021).

Поступила в редакцию 26.07.2021

После доработки 15.12.2021

Принята к публикации 09.03.2022

AGE AND RECENT EVOLUTION OF LANDSCAPE ELEMENTS OF THE KAMA-KELTMA LOWLAND (THE UPPER KAMA RIVER BASIN)

N.N. Nazarov¹, I.F. Frolova²

^{1,2} Perm State University, Department of Physical Geography and Landscape Ecology

¹ Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: nikolainazarovpsu@gmail.com

² Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: irvik13@gmail.com

The problem of identifying relic, conservative and progressive landscape elements within forest and bog geosystems of the Upper Kama River basin became resolvable as a result of complex paleogeographic investigations within the Kama-Keltma lowland. The principal components of the study were the application of the Earth remote sensing methods and identification of the relative and absolute ages (direct dating) of bog, alluvial and underlying sediments of ancient water reservoirs. The physiognomic and morphological differences between structures of different ages were determined by the degree of their resistance to exodynamic processes

and climate changes. Relic landscape elements are individual structural units of the landscape (stow, groups of stows) in which natural components, or their combinations correspond to the natural conditions of ancient geosystems with a period of formation exceeding the time of formation of the landscape invariant under consideration. Their stability in time is explained by complete or partial isolation from matter and energy flows generated by adjacent geosystems. As a rule, this results from a higher location of such geosystems among other territorial complexes which makes them inaccessible to geodynamic and geochemical processes within the geosystems of middle and low levels of the landscape. Conservative and progressive landscape elements are mostly confined to low and medium terrain levels. The most dynamic geosystems, i.e. natural aquatic complexes, are located at the lowest elevations of the relief. The studies have shown that conservative landscape elements could not be identified using the pre-established criteria for the most common landscape elements due to their large proportion in the structure of geosystems of different ages. These geosystems were defined as natural territorial complexes that do not meet the criteria for being relic or progressive landscape elements. Despite the seeming simplicity of solving the problem, the objective identifying of such geosystems will depend on the objective identifying of elements “from the past” and “from the future”, i. e. proper identification of the boundaries of relic and progressive landscape elements.

Keywords: relic landscape elements, spatial structure, relief, forest geosystems, remote sensing methods, space image

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-05-00276).

REFERENCES

- Alexandrovskii A.L. Phases and rates of soil evolution within river floodplains in the center of the Russian Plain, *Eurasian Soil Science*, 2004, no. 11, p. 1285–1295.
- Alexandrovskii A.L., Glasko M.P. Vzaimodejstvie alljuvial'nyh i pochvoobrazovatel'nyh processov na raznyh etapah formirovaniya pojm ravninnyh rek v golo-cene (na primere rek central'noj chasti Vostochno-Ev-ropejskoj ravniny) [Interaction of alluvial and soil formation processes at different stages of the floodplain's development during the Holocene (the rivers in the central part of the East European Plain as an example)], *Geomorfologija*, 2014, no. 4, p. 3–17. (In Russian)
- Eremeeva E.A., Leonova N.B. [Relic communities of island pine forests in the landscapes of the Eurasian steppes], *Stepi Severnoj Evrazii: materialy VIII Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Steppes of Northern Eurasia], 2018, p. 375–378. (In Russian)
- Genkel' A.A. Bolota Permskoj oblasti [Bogs in the Perm oblast], *Uchenye zapiski Permskogo universiteta. Biogeografija i kraevedenie*, 1974, vol. 131, no. 2, p. 4–85. (In Russian)
- Glebov F.Z., Dzhanseitov K.K. O skorosti zabolachivaniya Zapadno-Sibirskoj ravniny [On the rate of swamping of the West Siberian Plain], *Geografija i prirodnye resursy*, 1983, no. 3, p. 144–146. (In Russian)
- Gorchakovskij P.L. *Lesnye oazisy Kazahskogo melkosopohnika* [Forest oases of the Kazakh Upland], Moscow, Nauka Publ., 1987, 158 p. (In Russian)
- Horoshev A.V. Landshaftnye uslovija stabil'nosti fitoprodukcionnogo funkcionirovaniya v Ajtuarskoj stepi (Juzhnyj Ural) [Landscape conditions of stable phytoproduction in the Aituar steppe (the Southern Urals)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 2, p. 82–91. (In Russian)
- Isachenko A.G. *Landshaftovedenie i fiziko-geograficheskoe rajonirovanie* [Landscape studies and physical-geographical zoning], Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1991, 336 p. (In Russian)
- Kalinin N.A. Uslovija formirovaniya i prognoz sil'nyh osadkov s pomoshh'ju indeksov neustojchivosti atmosfery na territorii Ural'skogo Prikam'ja [Conditions of formation and forecast of heavy precipitation with the help of indices of atmospheric instability in the territory of the Ural Prikamye], *Geograficheskij vestn.*, 2019, no. 4(51), p. 96–112, DOI: 10.17072/2079-7877-2019-4-96-112.
- Karamysheva Z.V., Rachkovskaja E.I. *Botanicheskaja geografija stepnoj chasti Central'nogo Kazakhstana* [Botanical geography of the steppe part of Central Kazakhstan], Leningrad, Nauka Publ., 1973, 250 p. (In Russian)
- Kvasov D.D. *Pozdnechetvertichnaja istorija krupnyh ozer i vnutrennih morej Vostochnoj Evropy* [Late Quaternary history of large lakes and inland seas of Eastern Europe], Leningrad, Nauka Publ., 1975, 280 p. (In Russian)
- Larsen E., Fredin O., Jensen M., Kuznetsov D., Lysa A., Subetto D. Subglacial sediment, proglacial lake-level and topographic controls on ice extent and lobe geometries during the Last Glacial Maximum in NW Russia, *Quaternary Science Reviews*, 2014, vol. 92, p. 369–387.
- Lavrov A.S., Potapenko L.M. *Neoplejstocen severo-vostoka Russkoj ravniny* [Neopleistocene of the northeast of the Russian Plain], Moscow, Ajerogeologija Publ., 2005, 348 p. (In Russian)
- Lysa A., Larsen E., Buylaert J.-P., Fredin O., Jensen M., Kuznetsov D. Late Pleistocene stratigraphy and sedimentary environments of the Severnaya Dvina-Vychegda region in northwestern Russia, *Boreas*, 2014, vol. 43, p. 759–779.
- Milkov F.N. Problema relikto v fizicheskoj geografii [The problem of relics in physical geography], *Izvestija AN SSSR, Ser. Geograficheskaja*, 1989, no. 6, p. 5–17. (In Russian)
- Nazarov N.N. K voprosu o vremeni poslednego massovogo sprjamenenija izluchin na verhnjej Kame [On the question of time of the last mass rectification of bends on the Upper Kama River], *Vestn. Udmurtskogo un-ta, Ser. Biologija, Nauki o Zemle*, 2014, no. 2, p. 105–111. (In Russian)
- Nazarov N.N. Plejstocenovyje perestrojki rechnykh rusel i sovremennoe razvitie pojmenno-ruslovykh kompleksov verhnjej Kamy [Pleistocene reorganization and recent development of river channels in the Upper Kama River basin], *Geomorfologija*, 2017, no. 3, p. 88–100, DOI: 10.7868/S0435428117030087.

- Nazarov N.N., Chernov A.V., Kopytov S.V. Perestrojki rechnoj seti Severnogo Predural'ja v pozdnem plejstocene i golocene [River's network rearrangements of the Northern Pre-Urals in the Late Pleistocene and Holocene], *Geograficheskij vestn.*, 2015, no. 3(34), p. 26–34. (In Russian)
- Nazarov N.N., Kopytov S.V. Ispol'zovanie dannyh distancionnogo zondirovaniya v izuchenii perestroek rechnoj seti (na primere verhnjej Kamy) (The use of remote sensing data in the study of river network restructuring (by example of the Upper Kama), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019b, vol. 16, no. 1, p. 105–117, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-105-117.
- Nazarov N.N., Kopytov S.V. Rekonstrukciya etapov razvitiya Kel'tminskoj lozhbiny po geomorfologicheskim dannym (Predural'e) (Reconstructing the evolution stages of the Kel'tma hollow from geomorphological data (Pre-Ural Region), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2019a, no. 3, p. 154–164. (In Russian)
- Nazarov N.N., Kopytov S.V., Chernov A.V. K voprosu o vozraste pojma preryvисто-dinamicheskogo razvitiya (na primere verhnjej Kamy) [On the age of floodplains of discontinuous and dynamic development (case study of the Upper Kama River)], *Geograficheskij vestn.*, 2016, no. 3(38), p. 15–27. (In Russian)
- Nejshtadt M.I. [The formation and rate of development of the bog process], *Nauchnye predposylki osvoenija bolot Zapadnoj Sibiri* [Scientific prerequisites for the development of swamps in Western Siberia], 1977, p. 39–47. (In Russian)
- Nikolaev V.A. O vozraste landshaftov [About the age of landscapes], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 1976, no. 2, p. 45–55. (In Russian)
- Polynov B.B. *Geograficheskie raboty* [Geographic works], Moscow, Geografiz Publ., 1952, 400 p. (In Russian)
- Polynov B.B. Landshaft i pochva [Landscapes and soil], *Priroda*, 1925, no. 1–3, p. 73–84. (In Russian)
- Prognoz klimaticheskoj resursoobespechennosti Vostochno-Evropskoj ravniny v usloviyah potepneniya XXI veka* [Forecast of the climatic resource availability of the East European Plain under climate warming in the XXI century], Moscow, MAKS Press Publ., 2008, 292 p. (In Russian)
- Rostom G.R. [Relict landscapes in the forest-steppe zone of the East European Plain], *Stepi Severnoj Evrazii: materialy I Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Steppes of Northern Eurasia], 1997, p. 39–40. (In Russian)
- Sukachjov V.N. *Izbrannye trudy v treh tomah, t. 2, Problemy bolotovedenija, paleobotaniki i paleogeografii* [Selected works in three volumes, vol. 2, Problems of bog science, paleobotany and paleogeography], Leningrad, Nauka Publ., 1973, 352 p. (In Russian)
- Web resource*
- Berezhnoj A.V. [Relic landscape complexes and their diversity in the steppes of the Russian Plain], *Stepi Severnoj Evrazii: materialy I Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Steppes of Northern Eurasia], 1997, URL: <http://orensteppe.org/content/reliktovyje-landshaftnye-kompleksy-i-ih-raznoobrazie-v-stepyah-russkoy-ravniny> (access date 16.07.2021). (In Russian)

Received 26.07.2021

Revised 15.12.2021

Accepted 09.03.2022

УДК 911.3

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ЖИЗНЕСТОЙКОСТИ ГОРОДОВ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Н.Ю. Замятина¹, Е.А. Котов², Р.В. Гончаров³, А.В. Бурцева⁴, В.И. Гребенец⁵,
А.А. Медведков⁶, В.А. Молодцова⁷, В.П. Ключева⁸, Ю.В. Кульчицкий⁹, Б.А. Миронова¹⁰,
Б.В. Никитин¹¹, А.Н. Пилясов¹², А.Е. Поляченко¹³, А.В. Потураева¹⁴, Д.А. Стрелецкий¹⁵,
И.А. Шамало¹⁶

^{1, 5, 6, 11, 12, 14, 16} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

^{2, 3, 7, 9, 13} Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

⁴ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Высшая школа инженерной педагогики, психологии и прикладной лингвистики

^{8, 15} Тюменский научный центр СО РАН

¹⁰ Аналитический центр АНО «Московский урбанистический форум»

¹ Кафедра социально-экономической географии зарубежных стран, доц., канд. геогр. наук;

e-mail: zamyatina@geogr.msu.ru

² Факультет городского и регионального развития / Высшая школа урбанистики имени А.А. Высоковского,
ст. препод., науч. сотр.; e-mail: ekotov@hse.ru

³ Факультет городского и регионального развития / Высшая школа урбанистики имени А.А. Высоковского,
доц., канд. геогр. наук; e-mail: rgoncharov@hse.ru

⁴ Доц., канд. пед. наук; e-mail: alexandraburtseva@yandex.ru

⁵ Кафедра криолитологии и гляциологии, доц., канд. геогр. наук; e-mail: vgreb@inbox.ru

⁶ Кафедра физической географии мира и геоэкологии, доц., канд. геогр. наук; e-mail: a-medvedkov@bk.ru

⁷ Факультет городского и регионального развития / Высшая школа урбанистики имени А.А. Высоковского,
препод., мл. науч. сотр.; e-mail: vmolodtsova@hse.ru

⁸ Институт проблем освоения Севера, сектор социальной антропологии,
вед. науч. сотр., канд. ист. наук; e-mail: vormpk@gmail.com

⁹ Факультет городского и регионального развития / Высшая школа урбанистики имени А.А. Высоковского,
препод.; e-mail: kulchitsky@hse.ru

¹⁰ Аналитик; e-mail: Mironova@mosurbanforum.ru

¹¹ Кафедра социально-экономической географии зарубежных стран, асп.; e-mail: borisnikitin25@gmail.com

¹² Кафедра социально-экономической географии зарубежных стран, проф., д-р геогр. наук; e-mail: pelyasov@mail.ru

¹³ Факультет экономических наук, студент; e-mail: apolyachenko@gmail.com

¹⁴ Кафедра социально-экономической географии зарубежных стран, асп.; e-mail: av-poturaeva@yandex.ru

¹⁵ Институт криосферы земли, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: strelets@udel.edu

¹⁶ Кафедра социально-экономической географии зарубежных стран, асп.; e-mail: vshamalo@rambler.ru

Жизнестойкость, понимаемая как способность городских систем к преодолению природных или антропогенных кризисов, рассматривается как концепция, взаимно дополняющая концепцию устойчивого развития. В условиях Арктики, отличающейся повышенной уязвимостью как природных, так и экономических систем, применение концепции жизнестойкости особенно актуально. В статье проанализированы 19 количественных индикаторов 27 арктических населенных пунктов РФ по следующим подсистемам: экономической специализации, жизнеобеспечения и коммунального хозяйства, социально-культурной, природно-экологической, административно-управленческой. В ходе кластерного анализа выявлены семь стабильных групп городов, устойчиво демонстрирующих сходство друг с другом при различных вариантах анализа. Преодоление кризисов в развитии города требует одновременного выполнения условий жизнестойкости в разных подсистемах городского развития: слабость любой из этих подсистем может повлечь крах всей системы в целом, поэтому оценка жизнестойкости требует комплексного подхода.

Ключевые слова: устойчивое развитие, арктические города, социально-экологические системы

ВВЕДЕНИЕ

Жизнестойкость – сравнительно новый подход к развитию городов по сравнению с устойчивостью. Они взаимодополняют друг друга: разница заключается в том, что концепции устойчивости работают на стабильных, заданных траекториях, тогда как жизнестойкость отвечает за выживание города в условиях кризисов, в точках бифуркации, на смене траекторий развития. Данный аспект был детально рассмотрен как в наших предыдущих работах [Замятина и др., 2020], так и в работах коллег (в частности, несколько иной взгляд на соотношение жизнестойкости и устойчивости дан в работах [Vlasova et al., 2021; Жихаревич и др., 2020]), поэтому детальный анализ собственно концепции жизнестойкости не включен в данную статью.

Введение понятия жизнестойкости для городов Арктики особенно важно. Более ранние работы позволяют уверенно утверждать, что арктические города отличаются повышенной уязвимостью как с точки зрения природной среды, так и в сфере социальноэкономического развития, поэтому здесь анализ возможностей преодоления кризисов как нигде важен [Бабурин и др., 2016; Zamyatina, Goncharov, 2018]. Особенно актуальна тема жизнестойкости для Российской Арктики, пережившей за последнюю четверть века абсолютно беспрецедентные трансформации системы расселения [Бабурин, Земцов, 2015; Kumo, Litvinenko, 2020].

Заметим, что сама тема жизнестойкости различных социальных, социоэкологических систем относительно разработана, в том числе для Арктики [Council, 2016; Vlasova et al., 2021], однако в отношении именно городов Арктики, обладающих целым рядом специфических особенностей, работ почти нет. Новизна данной работы состоит, во-первых, в самом обращении к теме жизнестойкости арктических городов, во-вторых, в разработке комплексной методики ее анализа, включающей особенности многолетнемерзлых пород и климата, миграционные показатели, транспортно-географическое положение, структуру экономики и особенности развития малого бизнеса, организации системы теплоснабжения, жилой застройки, инновационной деятельности, административного управления и др.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Проблема выбора параметров оценки жизнестойкости коренится в неоднозначности самого термина: на данный момент нет консенсуса даже в отношении термина, пригодного для использования на русском языке (см. детальный анализ в [Жихаревич и др., 2020]). В свою очередь, неоднозначность термина «жизнестойкость» во многом связана с его

двойным происхождением: термин возник в экологии и почти одновременно в психологии (и в данных отраслях на русском языке закрепилось понятие «жизнестойкость»), а затем был перенесен в экономику и экономическую географию (где по поводу не только перевода термина, но в отношении вариативности его наполнения возникли дискуссии). Мы хотели бы в максимальной степени сохранить исходное значение термина – настолько, насколько возможно при перенесении его в географию – и следуем традиции перевода термина *resilience* именно как «жизнестойкость», чтобы не прерывать преемственность с экологией и психологией [Замятина и др., 2020].

В практике анализа жизнестойкости городов, в свою очередь, сложилось два основных подхода, каждый из которых имеет как достоинства, так и недостатки. Первый подход учитывает сложность городской системы, включает экологические, управленческие, поведенческие, экономические аспекты. Однако приверженцы данного подхода не выходят на обобщение, работая на микроуровне с отдельными городами [Collier et al., 2014].

Второй подход заключается в количественной оценке жизнестойкости на больших массивах данных, однако, жизнестойкость при этом, по сути, редуцируется к сугубо экономическим аспектам. В общем случае критерием проявления жизнестойкости служит динамика численности населения и/или валового продукта. Различные параметры тестируются на предмет объясняющей силы этих изменений, хотя есть различные вариации в методиках анализа. Например, Р. Мартин для расчета жизнестойкости использовал набор двух показателей: сопротивляемости (способности сохранять исходные экономические показатели во время кризиса) и восстановительной способности [Martin, 2012]. Отдельные авторы дополнительно использовали методы сдвига доли [Giannakis, Bruggeman, 2015] или статистического анализа взаимного влияния по полученным показателям [Fingleton et al., 2011]. Сильной стороной подобного «экономоцентричного» подхода является безусловное доказательство роли того или иного фактора в формировании траектории прохождения города через кризис, а слабой – узость сферы анализа (например, в работе [Martin, 2012]).

Сходство обоих подходов состоит в том, что жизнестойкость в обоих случаях оценивается эмпирически – как реакция на кризис. В первом случае речь идет о многокомпонентном наборе параметров жизнестойкости, описывающем структуру города как сложной системы. Во втором случае проводится оценка влияния некоторых факторов на узкий аспект жизнестойкости города – его экономическую жизнестойкость – зато по большой выборке горо-

дов, сопоставимых с точки зрения опыта преодоления конкретного кризиса.

Тем не менее, учитывая безусловное преимущество второго подхода (возможность сравнения городов между собой), мы провели предварительное исследование по методике Мартина [Martin, 2012], расширив круг использованных параметров за счет ряда природных, транспортно-географических и других показателей. Была проведена оценка жизнестойкости российских арктических городов в долгосрочном (1989–2017) и относительно краткосрочном (2009–2016) периодах [Polyachenko, 2019]. Однако данный «универсальный» подход оказался неприменим к Российской Арктике: население многих городов сокращается в течение почти всего периода, начиная с 1989 г. и делая невозможным измерение собственно «кризиса». Для группы «нефтегазовых» городов, рассмотренных отдельно, положительно влияющими на жизнестойкость факторами оказались: начальная стадия ресурсного цикла, статус регионального центра, высокая доля коренного населения в «хинтерланде» города, крупный размер самого города; отрицательно влияющий фактор – расположение в пригородной зоне более крупного города. Для прочих городов к положительным факторам относятся: статус регионального административного центра, выраженная роль некоторых отраслей бюджетного сектора (оборонная промышленность, атомная энергетика и т. п.), доля занятых в образовании, роль центрального места (по положению в сети расселения). Интересно, что расположение на берегу моря или судоходной реки оказалось отрицательно связано с жизнестойкостью в долгосрочном периоде (очевидно, сказывается кризис перевозок по Севморпути в 1990-е гг.). Полученные выкладки были использованы для дальнейшего анализа, однако, очевидная ограниченность второго подхода к оценке жизнестойкости – через универсальный критерий – заставила от него отказаться.

В итоге, была предпринята попытка смешанного подхода: от первого из названных выше подходов были взяты представления о жизнестойкости как функции устройства многокомпонентной системы города, от второго – нацеленность на сопоставление большого ряда городов по единым критериям. При этом пришлось отойти от собственно оценки жизнестойкости как реакции на кризис, перейдя к оценке *потенциальной жизнестойкости* на основе анализа особенностей городской системы. Иными словами, от тестирования показателей жизнестойкости на предмет роли в преодолении кризиса мы перешли к параметрам городской системы, которые предположительно должны обеспечить жизнестойкость системы при потенциальном кризисе.

Правомерность данного перехода обусловлена заданными условиями выбора показателей для каждой из отдельных подсистем: в качестве критерия выбора показателей была определена их связь с жизнестойкостью, показанная в более ранних исследованиях по особенностям реакции на кризис соответствующих подсистем (природно-экологической, экономической специализации, подсистемы жизнеобеспечения) или обнаруженная в процессе собственных полевых исследований (для описания социокультурной подсистемы).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика исследования включает четыре блока: выбор городов для анализа, составление многокомпонентного набора показателей потенциальной жизнестойкости, кластеризация городов Российской Арктики по многокомпонентному комплексному набору параметров потенциальной жизнестойкости.

Выбор городов для анализа. Для формирования выборки авторы воспользовались ранее апробированным приемом: в дополнение к 21-му арктическому городскому округу были добавлены некоторые крупнейшие населенные пункты муниципальных районов при соблюдении ряда условий [Zamyatina, Goncharov, 2018]. Всего, таким образом, в анализ было включено 27 населенных пунктов¹.

Составление многокомпонентного комплексного набора параметров жизнестойкости по отдельным подсистемам города базировалось на анализе литературы по конкретным подсистемам города, экспертном анализе материалов (в том числе полевых социально-географических исследований) по прохождению ряда кризисов в арктических городах (в частности, экономического кризиса 1990-х гг. в Мурманске, Апатитах, Никеле, Норильске, Игарке; аварии на газопроводе в Норильске в 1979 г. и др.).

Показатели отбирались, в первую очередь, по критерию соответствия теоретической модели жизнестойкости [Замятина и др., 2020], которая подразумевает способность городской системы противостоять кризису. Эта способность определяется тремя основными параметрами. Первый – *готовность к изменениям* в широком смысле, принятие риска нового: в случае кризиса развитие города может опереться на новые виды и формы деятельности. Второй – *вовлеченность* в мировые процессы (сам термин «вовлеченность» заимствован из психологической трактовки жизнестойкости и может быть интерпретирован как включенность во внешние взаимодействия, позволяющая как получать дополнительные ресурсы извне, так и отслеживать и объективно оценивать развитие ситуации).

¹ В границах АЗРФ по состоянию на июнь 2020 г.

Проиллюстрируем это на примере. У глобального города, концентрирующего экономические, политические, информационные потоки, выше шансы перенести какие-либо катаклизмы, чем у изолированной деревни – хотя она (в отсутствие катаклизмов) и могла бы сохранять стабильность на протяжении столетий. Здесь снова актуальна параллель между экосистемой с меняющейся численностью популяций отдельных видов, но выживающей при экстремальных изменениях внешних условий, и стабильной по численности популяций экосистеме, которая, однако, уязвима к экстремальным внешним изменениям [Holling, 1973]. Заметим, что параметры вовлеченности и готовности к изменениям необходимы, но недостаточны: монопрофильный город с высокой вовлеченностью в мировые экономические связи уязвим, и для его жизнестойкости необходим третий параметр – *контроль судьбы* (fate control) – широко используемая категория в работах как по жизнестойкости, так и по устойчивости развития, подразумевающая наличие ресурсов и возможностей для влияния на ситуацию.

В каждой из городских подсистем существуют свои особенности формирования жизнестойкости, которые измеряются отдельными параметрами. Так, в экономической подсистеме готовность к изменениям проявляется в способности к генерации и/или восприятию инноваций (то, что в зарубежной литературе по экономической географии называется «поглощающей способностью» местной производственной системы – absorptive capacity); в социуме готовность к изменениям – это креативность, «открытость мышления», которая традиционно (по Флориде) оценивается через показатели толерантности, разнообразия (как необходимого ресурса для креативности), развития творческих видов деятельности и т.п. Контроль судьбы в случае города – это достаточные и разнообразные ресурсы для развития экономических видов деятельности (система экономической специализации), доверие (в том смысле, как оно используется в социологии – trust) к месту у местного населения (можно также вспомнить понятие *топофилии* И-Фу Туана): в случае кризиса и доверия к месту сообщество готово бороться за город, а не мигрировать в другие места. В то же время контроль судьбы включает институциональные возможности влиять на развитие города (социокультурная подсистема). В административном плане у жизнестойкого города должна быть действенная система самоуправления, при этом желателен также высокий административный статус. Из пяти городских подсистем, выделенных в модели (экономической специализации, административно-управленческой, жизнеобеспечения, социокультурной и природно-экологической), на-

званные параметры не применимы только к природно-экологической подсистеме. В основу оценки ее параметров жизнестойкости было положено представление о природно-экологической подсистеме города как источнике экосистемных услуг для других подсистем (включая услуги по предоставлению продовольствия, воды, ресурсов топлива и т.д.), а жизнестойкость – как возможность, в первую очередь, резкого увеличения (в условиях кризиса) объемов экосистемных услуг (кроме того, учитывается минимизация риска необратимых изменений в подсистеме в условиях внешних воздействий).

Названные три параметра основаны на теоретическом изучении и сопоставлении разных подходов к оценке жизнестойкости – теоретические выкладки были проверены на основе изучения поведения отдельных подсистем арктических городов как в специальной литературе, так и в ходе полевых исследований; более детально рассмотреть обоснование теоретической схемы выбора параметров нет возможности из-за ограничения объема статьи.

Отбор показателей был проведен в два этапа: на первом этапе были отобраны 35 показателей, соответствующих теоретической модели жизнестойкости, затем, после детального анализа (в том числе корреляционного анализа, парных диаграмм рассеяния и применения метода главных компонент), были отобраны 19 показателей (по три-четыре для каждой подсистемы).

Подсистема экономической специализации. Очевидным и хорошо изученным фактором жизнестойкости города (фактором преодоления экономического структурного кризиса) выступает уровень диверсификации его экономики [Замятина, Пилясов, 2015]. Отраслевое разнообразие стимулирует экономические взаимодействия, способствует инновационному процессу и снижает риск фатальных последствий для города в случае деградации одного из секторов (в условиях Российской Арктики, где значительная часть городов сформировалась в связи с разработкой близлежащих месторождений полезных ископаемых, большое значение приобретает угроза истощения сырьевой базы) [Hopkins, 2018]. Общеизвестный фактор повышения жизнестойкости города в случае кризиса в градообразующей отрасли – это способность к инновационному поиску [Замятина, Пилясов, 2015].

Исходя из этих особенностей, для оценки уровня жизнестойкости были выбраны широко известный *индекс Херфиндаля-Хиршмана*, посчитанный по показателям занятости по секторам городской экономики (Росстат), а также широко используемый показатель *патентной активности*. Кроме того, был впервые применен показатель *наличия в городе инновационных предприятий*, отобранных экспер-

ным путем по базе данных организаций СПАРК (в контексте количественной оценки жизнестойкости экономики города особое внимание уделяется инновационным фирмам, предлагающим технологические, организационные или маркетинговые нововведения [Klimanov et al., 2020]).

К сожалению, некоторые статистические данные представляются искаженными, в частности, явно занижен уровень занятости в добывающей промышленности некоторых городов ЯНАО (их жители, работающие на удаленных от города месторождениях, в том числе работающие вахтовым методом, регистрируются по месту работы). В отдельных случаях это обстоятельство искажает значения индекса Херфиндаля-Хиршмана (очевидный пример – город Муравленко), хотя в целом индекс дает, по-видимому, адекватную картину. Отчасти для нивелирования этих искажений был привлечен комплексный показатель уровня развития добывающей промышленности – балльная оценка, основанная на следующих показателях:

а) доля территории в радиусе 150 км, находящейся в границах лицензионных участков (ЛУ) углеводородных ресурсов и твердых полезных ископаемых;

б) доля территории в радиусе 150 км, находящейся в границах перспективных лицензионных участков углеводородных ресурсов и твердых полезных ископаемых (с лицензией на проведение поисковых работ);

в) число лицензионных участков разных типов в радиусе 150 км [Гончаров и др., 2021].

Кажущееся дублирование показателей (учет и относительных, и абсолютных метрик) обусловлено особенностями добывающей промышленности: лицензионные участки углеводородных ресурсов могут отличаться значительными размерами (поэтому в местах добычи УВС важны именно относительные метрики), тогда как участки по добыче твердых полезных ископаемых обычно небольшие по размерам (места их концентрации обнаруживаются через абсолютные метрики).

Подсистема жизнеобеспечения. Система теплоснабжения имеет критическую важность для жизнестойкости населенных пунктов в климатических условиях Арктики. Для оценки состояния систем теплоснабжения арктических городов авторами были собраны данные из схем теплоснабжения. *Отношение резерва/дефицита тепловой мощности к тепловой нагрузке* отражает возможности теплоснабжающих организаций, обслуживающих населенные пункты, оперативно заместить мощности, выведенные из строя в случае чрезвычайных происшествий, и, в первом приближении, возможность «контроля судьбы». Рассматривались также показатели отношения потерь в тепловой сети к те-

пловой нагрузке, доли местного топлива, структуры используемого топлива (доля угля, нефти и др.) – однако собрать полный набор показателей по совокупности исследованных городов не удалось.

Кроме того, были использованы данные по доле *деревянного жилого фонда в общем объеме многоквартирного жилья* по федеральной базе «Реформа ЖКХ» (в условиях Крайнего Севера многоквартирное деревянное жилье² – это, как правило, низкокачественный жилой фонд типовых домов 1960–1970-х гг., непрестижные «деревяшки»). По сути, выбранный параметр характеризует долю устаревшего жилого фонда. Кроме того, была использована *балльная оценка транспортной обеспеченности*, детально описанная в более ранних работах [Гончаров и др., 2021]. Другие отрасли, связанные с жизнеобеспечением (пищевая промышленность, водоснабжение и др.), по предварительным оценкам не дают сильной дифференциации городов и были исключены из рассмотрения.

Социокультурная подсистема. При оценке жизнестойкости социокультурной подсистемы авторы отталкивались от понимания жизнестойкости в психологии [Maddi, Khoshaba, 2005] как сочетания вовлеченности во внешние связи, способности к контролю судьбы и инновационным изменениям. Первый показатель – «контроль судьбы» (от англ. fate control) – также широко используется в исследованиях по устойчивому развитию [Arctic Social Indicators..., 2010]. Из примерно двух десятков изначально рассмотренных показателей были отобраны четыре. Вовлеченность во внешние связи оценена через *отношение среднего значения исходящей миграции за 2017–2019 гг. к миграционному обороту* (сумме выехавших и въехавших). Сальдо миграции использовать нецелесообразно, т. к. практически все арктические города отличаются большим миграционным оборотом [Zamyatina, Goncharov, 2018]. Очень сложно было выбрать показатель «контроля судьбы». В зарубежных работах опираются, как правило, на показатели развития демократических институтов – особенно если дело касается вовлечения отдельных категорий местных жителей (женщины, коренные народы и т. д.) – однако с учетом российских политических реалий (в частности, ситуации контроля выборных органов власти градообразующими предприятиями) от подобных оценок было решено отказаться. В итоге, в качестве базового был выбран показатель *количества предприятий малого и среднего бизнеса на 1000 жителей* – не только как показатель уровня развития предпринимчивости и гибкости экономического поведения, но и как по-

² Из этого не следует, что деревянное домостроение как таковое снижает жизнестойкость, однако качественных жилых деревянных домов в Российской Арктике крайне мало.

казатель уровня доверия к территории («не верим в будущее города – не инвестируем»), что четко проявляется в полевых исследованиях).

Арктические города России традиционно отличаются большим этнокультурным разнообразием, и данный аспект, на взгляд авторов, непременно требует учета. Поэтому было решено ввести необычный показатель – *зарегистрированное число национально-культурных автономий на 1000 жителей*. Опыт работы членов авторского коллектива с миграционной службой и службами адаптации мигрантов (А.В. Бурцева), этнологического мониторинга и раннего предупреждения конфликтов (В.П. Ключева) позволяет экспертно оценивать данный показатель как хороший индикатор способности этнокультурных групп легально отстаивать свои интересы в диалоге с органами власти. Тем самым данный показатель в большей мере отражает наличие институциональных механизмов контроля судьбы мультиэтнического городского сообщества, и в этом качестве «работает» лучше, чем показатели этнического разнообразия как такового, равно как и территориальная структура миграционных потоков (которые тоже рассматривались на первом этапе).

В качестве показателя способности к инновационному развитию был выбран традиционный уже показатель *числа публикаций в РИНЦ за последние пять лет на 1000 жителей* [Смирнов, 2020]; рассматривались также показатели числа зарегистрированных пользователей РИНЦ, а также зарубежных баз научных публикаций; наличие университета и/или число студентов [Замятина, Гончаров, 2020] – все они в целом высоко коррелируют между собой.

Природно-экологическая подсистема. К числу природных факторов, характеризующих жизнестойкость городов (с тем или иным знаком), были отнесены следующие составляющие геосистемного покрова: *универсальный индекс теплового дискомфорта*, используемый для оценки жесткости погоды [Fiala et al., 2012; Виноградова, 2019], показатель *овражности* – один из наиболее выразительных количественных показателей, раскрывающий потенциал развития механической денудации, обусловленный расчлененностью рельефа и литологическими условиями территории [Современные изменения..., 1996; Национальный атлас..., 2007], *годовая продукция фитомассы* как интегральный параметр, часто используемый и в оценках устойчивости природной среды [Исаченко, 2003], поскольку биопродукционные характеристики определяют средозащитный потенциал мерзлотных ландшафтов и скорость их восстановления после механической и аэротехногенной трансформации. Наконец, важнейшим показателем стал собственный индекс *распространения многолетнемерзлых пород*, оце-

ненный через сочетание *характера распространения* (сплошной, прерывистый и массивно-островной) и *льдистости многолетнемерзлых пород*³. С увеличением лдьистости и сплошности мерзлоты (которая также отражает суровость климата) падает жизнестойкость инфраструктуры: выше затраты на ее строительство и поддержание в рабочем состоянии.

Административно-управленческая подсистема. Набор показателей, который способен охарактеризовать жизнестойкость подсистемы управления, отличается от стандартных и достаточно хорошо известных показателей эффективности муниципального управления ввиду специфики задачи. Предварительную калибровку прошло около десятка показателей, в итоговом перечне оставлены три. *Административный статус города и уровень собственных доходов бюджета* (среднее за 2017–2019 гг.) показывают способность контроля судьбы, соответственно, в политико-административном и финансовом отношениях. Дополнительно использован также показатель *среднесписочной численности занятых в секторе «Государственное управление и обеспечение военной безопасности; социальное обеспечение» в соотношении с общим количеством занятых, в %* (среднее за 2017–2019 гг.). Показатель *расходов бюджета на одного жителя* (среднее за 2017–2019 гг.) косвенно отражает размер финансовых ресурсов, которые потенциально могут быть использованы самим городом для быстрого реагирования на кризисные ситуации.

Более детально выбор показателей отражен на созданном в рамках проекта ресурсе [Устойчивость арктических городов..., 2021].

Методика кластеризации городов. Первичный отбор переменных производился с привлечением метода главных компонент и анализа парных диаграмм рассеяния. Предпочтение отдавалось показателям, имеющим высокое влияние в первых пяти компонентах, позволяющих дифференцировать города, и далее разбить на группы по жизнестойкости, проведя кластерный анализ.

Набор данных с отобранными показателями был подготовлен для кластеризации:

- переменные со значительными, отличающимися на порядки, значениями были логарифмированы;

- все переменные были центрированы и масштабированы.

На первом этапе кластеризация производилась методами иерархической кластеризации и методом К-средних. Выбор лучшего числа кластеров производился методом «плеча» с оптимизацией характе-

³ По карте IPA <https://nsidc.org/data/ggd318>.

ристики компактности кластеров, а также методом оптимизации ширины «силуэта».

На втором этапе (ввиду неудовлетворительных результатов, получаемых при помощи классических методов) были применены методы *t*-SNE⁴ [Maaten, Hinton, 2008] и UMAP⁵ [McInnes et al., 2018] для снижения размерности набора данных (применяются, когда метод главных компонент не способен выделить первые два-три компонента с высокой долей объясняемой дисперсии, в том числе из-за большого числа переменных). При помощи алгоритмов снижения размерности данные проецировались в две переменных (аналог основных компонент). Ввиду элемента случайности в работе алгоритмов, каждая операция по снижению размерности была выполнена в 1000 итераций. К результатам каждой итерации снижения размерности был применен метод GMM⁶ [Scrusa et al., 2016] для кластеризации с автоматическим выбором оптимальной формы кластеров и оптимального числа кластеров по критерию максимизации BIC⁷. Исходные данные, код, воспроизводящий кластерный анализ, и графики опубликованы как дополнительные материалы к статье на GitHub [Kotov, 2022].

На последнем этапе полученные группы экспертно оценивались на предмет интерпретируемости.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Кластеризация городов по многокомпонентному комплексному набору параметров потенциальной жизнестойкости. Несмотря на многоступенчатый отбор переменных на первом этапе, результаты кластеризации классическими методами (иерархическая кластеризация и метод *K*-средних) не позволяют выделить устойчивые группы городов, которые бы характеризовались особыми значениями отобранных показателей и их комбинациями. Как видно из графиков (рис. 1), метод анализа ширины силуэта (справа) ложно указывает на 3 или 5 групп. Их действительно можно выделить, но, как видно на том же рисунке слева, компактность кластеров, независимо от метода кластеризации, снижается исключительно плавно, что говорит о нестабильности кластеров – малейшие вариации в значениях переменных, замена или исключение из анализа одной переменной немедленно приводят к перемещению значительного числа городов в совершенно другие группы.

⁴ *t*-SNE – *t*-distributed Stochastic Neighbor Embedding (стохастическое вложение соседей с *t*-распределением).

⁵ UMAP – Uniform Manifold Approximation and Projection.

⁶ GMM – Gaussian Mixture Model.

⁷ BIC – Bayesian Information Criterion (Байесовский информационный критерий).

Вывод о невозможности разбить рассматриваемые города на стабильные интерпретируемые группы классическими способами также подтверждается методом главных компонент. Как видно из графиков (рис. 2), только половина дисперсии объясняется первыми тремя компонентами, а чтобы объяснить при помощи переменных различия между городами (а следовательно, и группами городов) хотя бы на 75%, требуется уже минимум шесть компонент, каждая из которых включает влияние всех переменных. Это и приводит к невозможности формирования стабильных кластеров.

Только при применении описанной выше методики методом UMAP + GMM получилось выделить семь устойчивых групп городов (рис. 3) и проанализировать различия этих групп по исследуемым переменным (рис. 4). Сопоставление рисунков 3 и 4 позволяет выявить группы городов с относительно схожей конфигурацией системы жизнестойкости. Так, например, второй кластер (Воркута, Норильск, Дудинка) сильно «проигрывает» из-за суровости природных условий и транспортного положения – хотя имеет достаточно высокий уровень развития малого бизнеса и разнообразия социума; здесь почти нет деревянного жилья (существовавшие в этих городах ветхие деревянные бараки снесены). В целом, высокий уровень бюджетной обеспеченности (по показателю расходов бюджета на жителя), а также неплохой уровень развития малого бизнеса (в силу хорошо организованной господдержки) имеют ямальские города, Кола и Нарьян-Мар (шестая и седьмая группы). «Беда» шестой группы (Лабытнанги, Тарко-Сале, Ноябрьск, Муравленко, Салехард) – большая доля многоквартирного деревянного жилья (это низкокачественные двухэтажные строения типовых серий, а не индивидуальная застройка); этим они резко отличаются от большинства других «нефтегазовых» и иных городов с высокой бюджетной обеспеченностью (Губкинский, Новый Уренгой и др. – седьмая группа). Четвертая группа (Онега и др.) – это города с относительно однородным населением, изношенной инфраструктурой и высоким миграционным оттоком. Пятую группу составили очевидные лидеры по многим параметрам – Мурманск и Архангельск.

ВЫВОДЫ

Результаты применения целой серии методов оценки жизнестойкости и потенциала жизнестойкости арктических городов России убеждают в абсолютной специфичности феномена арктического города: значительная их часть имеет уникальный набор потенциальных параметров жизнестойкости, обусловленный различными комбинациями организации подсистем экономической специализации, жизне-

обеспечения, социально-культурной, природно-экологической и административно-управленческой.

Выводы работы можно разделить на концептуальную и прикладную составляющие. Концептуальный вывод состоит в том, что жизнестойкость арктических городов формируется каждый раз уникальным сочетанием социокультурных, институциональных, производственных, технологических

и природно-экологических параметров. Интересно отсутствие зависимости жизнестойкости от общей численности населения города, специализации и т.д., что разрушает многие стереотипы относительно закономерностей развития городов в целом: в Арктике крупнейшие города не являются ни самыми инновационными, ни самыми комфортными с точки зрения качества жилого фонда и т.д.

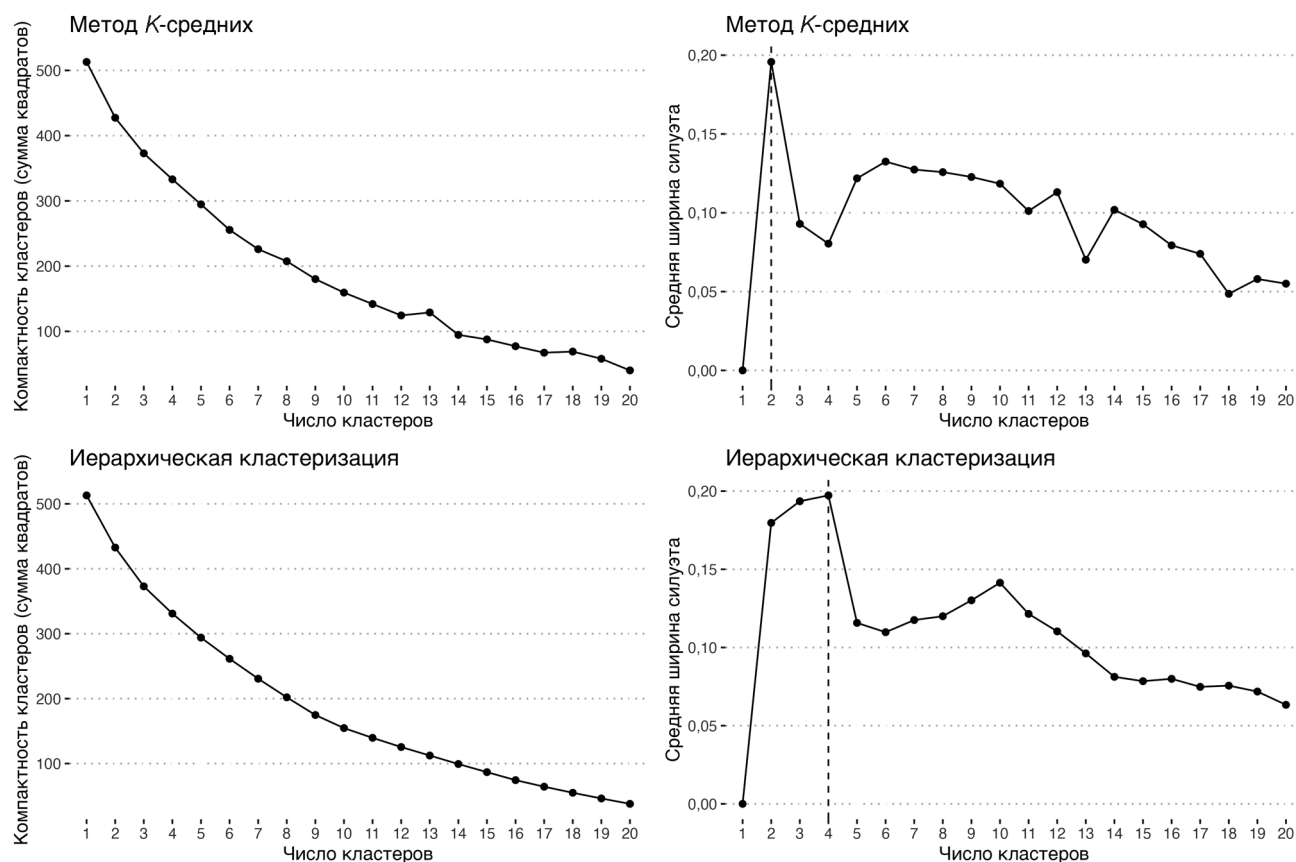


Рис. 1. Подбор оптимального числа кластеров формальными методами

Fig. 1. Selection of the optimal number of clusters using formal methods

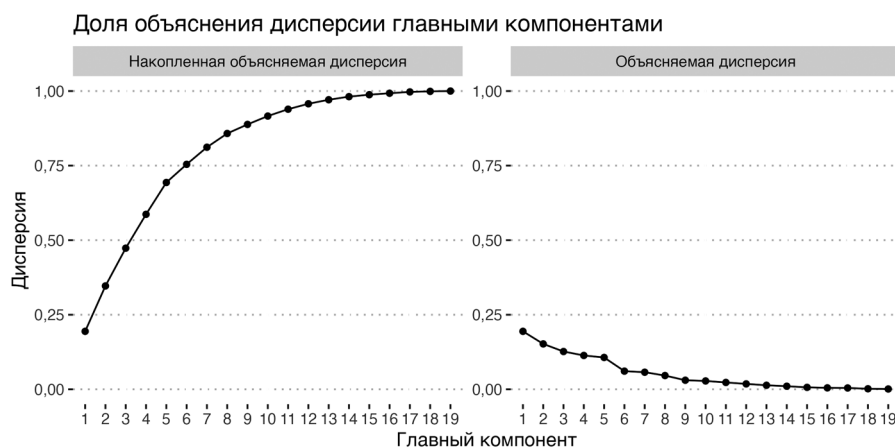


Рис. 2. Метод главных компонент на 19 отобранных переменных – объясняемая дисперсия

Fig. 2. The method of principal components on 19 selected variables – an explained variance

**Как часто города
попадают в один
кластер?**

на основе 1000 итераций

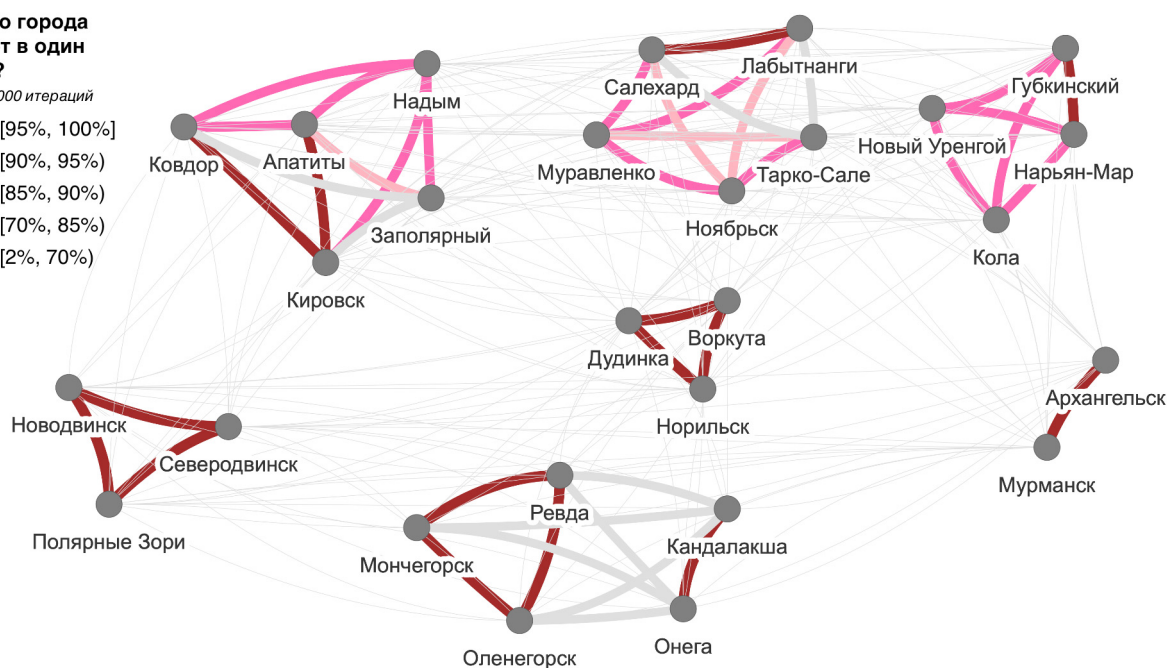
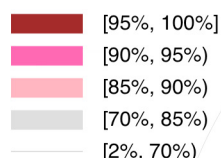


Рис. 3. Группы городов на основе GMM-кластеризации после снижения размерности методом UMAP

Fig. 3. Groups of cities based on GMM-clustering after reducing the dimension by the UMAP method

Главный прикладной вывод состоит в принципиальной неадекватности типовых решений для развития арктических городов: при относительно небольшом общем числе их совокупность отличается высоким разнообразием. Повышение жизнестойкости каждого из городов должно планироваться с опорой на самую сильную подсистему конкретного города, вокруг которой должна выстраиваться система взаимосвязи (и взаимозаменяемости в кризисных ситуациях) городских подсистем таким об-

разом, чтобы особенности сильной подсистемы создавали позитивные эффекты в более слабых – через перетоки кадров и инноваций, использование общей инфраструктуры, через развитие новых видов экономической деятельности, основанных на преимуществах «сильной» природно-экологической подсистемы, диверсификации экономики на основе многообразия опыта и внешних связей мультиэтнического городского сообщества и т. д. – в зависимости от конкретного города.

Благодарности. Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-60088 «Устойчивость развития Арктических городов в условиях природно-климатических изменений и социально-экономических трансформаций».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабурин В.Л., Бадина С.В., Горячко М.Д., Земцов С.П., Колтерманн К.П. Оценка уязвимости социально-экономического развития Арктической территории России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 6. С. 71–77.
- Бабурин В.Л., Земцов С.П. Эволюция системы городских поселений и динамика природных и социально-экономических процессов в Российской Арктике // Региональные исследования. 2015. Т. 50. № 4. С. 76–83.
- Виноградова В.В. Тепловое воздействие на территории России в середине XXI века по модельным данным // Известия РАН. Серия географическая. 2020. Т. 84. № 3. С. 404–413. DOI: 10.31857/S2587556620030115.
- Гончаров Р.В., Данькин М.А., Замятина Н.Ю., Молодцова В.А. Соборы в пустыне или опорные базы? Разнообразие городов и поселков Российской Арктики по характеру взаимосвязей с окружающей территорией // Городские исследования и практики. 2021. Т. 5. № 1. С. 33–56. DOI: <https://doi.org/10.17323/usp51202033-56>.
- Жихаревич Б.С., Климанов В.В., Марача В.Г. Шокоустойчивость территориальных систем: концепция, измерение, управление // Региональные исследования. 2020. № 3. С. 4–15. DOI: 10.5922/1994-5280-2020-3-1.
- Замятина Н.Ю., Гончаров Р.В. Арктическая урбанизация: феномен и сравнительный анализ // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 4. С. 69–82.

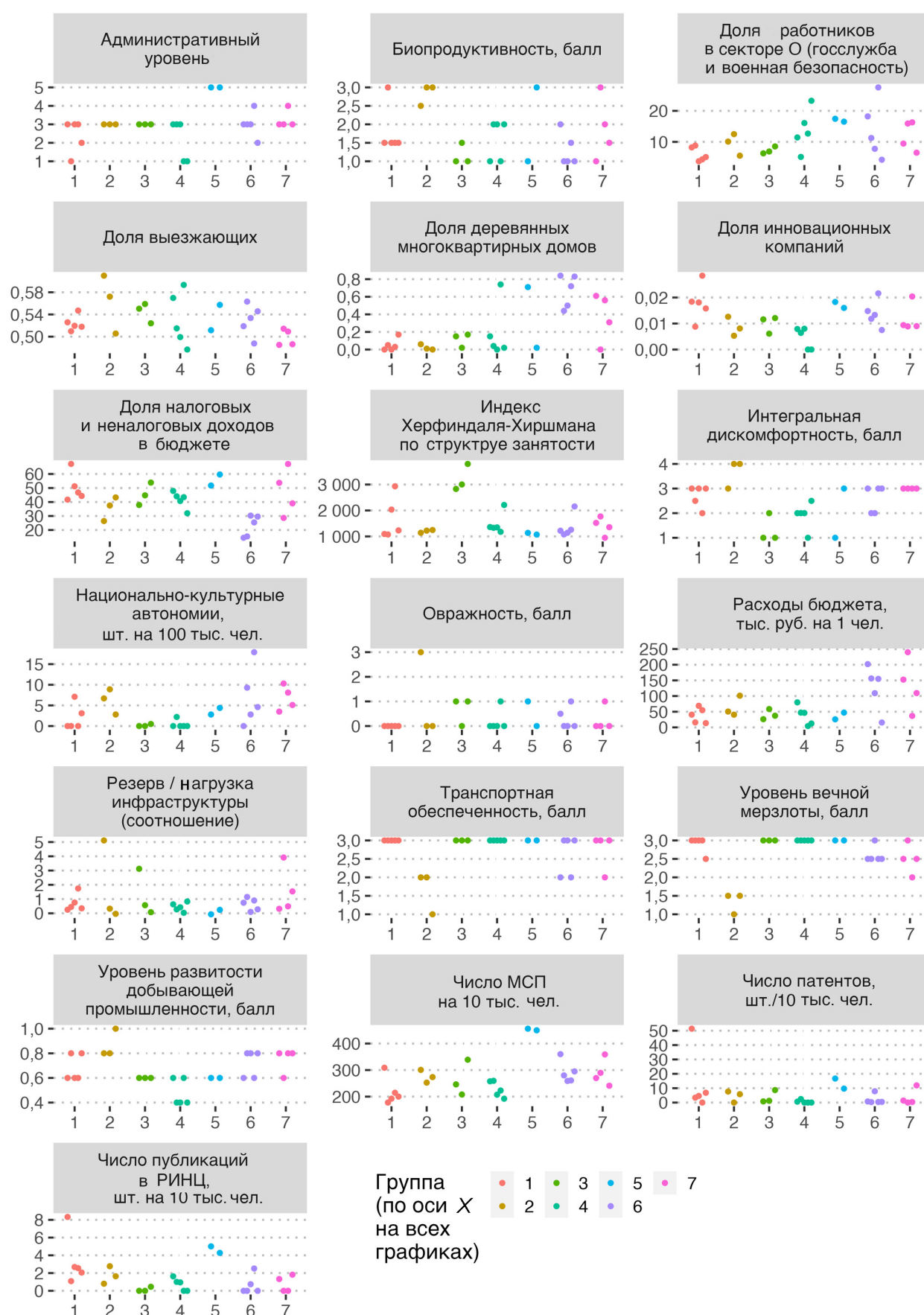


Рис. 4. Различия групп по значениям анализируемых переменных

Fig. 4. Differences between the groups by the values of analyzed variables

- Замятина Н.Ю., Медведков А.А., Поляченко А.Е., Шамало И.А. Жизнестойкость арктических городов: анализ подходов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2020. Т. 65. № 3. С. 481–505. DOI: 10.21638/spbu07.2020.305.
- Замятина Н.Ю., Пилясов А.Н. Инновационный поиск в монопрофильных городах: блокировки развития, новая промышленная политика и дорожная карта перемены. М.: УРСС, 2015. 216 с.
- Исаченко А.Г. Введение в экологическую географию. СПб.: СПбГУ, 2003. 192 с.
- Национальный атлас России. Т. 2: Природа. Экология / под ред. А.В. Бородко (предисл.), В.В. Свешников (гл. ред.) и др. М.: Роскартография, 2007. 496 с.
- Смирнов А.В. Человеческое развитие и перспективы формирования экономики знаний в Российской Арктике // Арктика: экология и экономика. 2020. № 2(38). С. 18–30. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-18-30.
- Современные изменения в литосфере под влиянием природных и антропогенных факторов / под ред. В.И. Осипова, А.Л. Яншина и др. М.: Недра, 1996. 222 с.
- Arctic Resilience Report, M. Carson and G. Peterson (eds.), Stockholm Environment Institute and Stockholm Resilience Centre, Stockholm, 2016, 218 p.
- Arctic Social Indicators – a follow-up to the Arctic Human Development Report, J.N. Larsen, P. Schweitzer, and G. Fondahl (eds.), Nordic Council of Ministers, Copenhagen, 2010, 159 p.
- Collier F., Hambling J., Macmillan S., Richardson E., Pérez A.P., Kovacevic B., Miller R., Kernaghan S. Tomorrow's cities: a framework to assess urban resilience, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Urban Design and Planning*, 2014, vol. 167(2), p. 79–91, DOI: 10.1680/udap.13.00019.
- Council A. Arctic resilience report, *Stockholm Environment Institute and Stockholm Resilience Centre*, 2016.
- Fiala D., Havenith G., Bröde P., Kampmann B., Jendritzky G. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation, *International journal of biometeorology*, 2012, vol. 56, p. 429–441, DOI: 10.1007/s00484-011-0424-7.
- Fingleton B., Garretsen H., Martin R. Recessional Shocks and Regional Employment: Evidence on the Resilience of UK Regions, *Journal of Regional Science*, 2012, vol. 52, no. 1, p. 109–133.
- Giannakis E., Bruggeman A. Economic crisis and regional resilience: Evidence from Greece, *Papers in Regional Science*, 2017, vol. 96, no. 3, p. 451–476.
- Holling C.S. Resilience and Stability of Ecological Systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, vol. 4, p. 1–23.
- Hopkins R. The Transition Handbook: From Oil Dependency to Local Resilience, Totnes, Devon: Green Books Ltd, 2018, 340 p.
- Klimanov V., Kazakova S., Mikhaylova A. Economic and Fiscal Resilience of Russia's Regions, *Regional Science Policy and Practice*, 2020, vol. 12, iss. 4, p. 627–640.
- Kumo K., Litvinenko T.V. Instability and stability in the population dynamics of Chukotka and its settlements in the post-soviet period: Regional features and intraregional and local differences, *Regional Research of Russia*, 2020, vol. 10, no. 1, p. 71–85.
- Maaten L.V.D., Hinton G. Visualizing Data using t-SNE, *Journal of Machine Learning Research*, 2008, vol. 9, p. 2579–2605.
- Maddi S., Khoshaba D. Resilience at work, New York, Amazon, 2005, 240 p.
- Martin R. Regional economic resilience, hysteresis and recessionary shocks, *Journal of Economic Geography*, 2012, vol. 12, no. 1, p. 1–32.
- McInnes L., Healy J., Melville J. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction, 2018, DOI: 10.48550/ARXIV.1802.03426.
- Polyachenko A. Regional Resilience of Russian Arctic Cities, *ERSA Abstract Book*, 2019, 346 p.
- Scrucca L., Fop M., Murphy T.B., Raftery A.E. Mclust 5: Clustering, Classification and Density Estimation Using Gaussian Finite Mixture Models, *The R Journal*, 2016, vol. 8(1), p. 205–233, DOI: 10.32614/RJ-2016-021.
- Vlasova T., Petrov A.N., Volkov S. Rethinking Sustainability Monitoring in the Arctic by Linking Resilience and Sustainable Development in Socially-Oriented Observations: A Perspective, *Sustainability*, 2021, vol. 13(1), p. 177, DOI: 10.3390/su13010177.
- Zamyatina N., Goncharov R. Arctic urbanization: resilience in a condition of permanent instability. The case of Russian Arctic cities, *Resilience and Urban Disasters Surviving Cities. New Horizons in Regional Science series*, K. Borsekova, P. Nijkamp (eds.), UK, Edward Elgar Publishing Ltd, 2018, p. 136–154.

Электронные ресурсы

- Устойчивость арктических городов / Сайт проекта «Устойчивость развития Арктических городов в условиях природно-климатических изменений и социально-экономических трансформаций». Грант РФФИ 18-05-60088. URL: <https://www.resilient-arctic-urban.space/> (дата обращения 09.03.2021).
- Kotov E. Clustering of Russian Arctic Cities: data, R code and plots, 2022, URL: <https://github.com/e-kotov/ru-resilient-arctic-clusters>, Zenodo, DOI: 10.5281/zenodo.6484062 (дата обращения 09.03.2021).

Поступила в редакцию 09.03.2021

После доработки 15.11.2021

Принята к публикации 09.03.2022

RESILIENCE POTENTIAL OF THE RUSSIAN ARCTIC CITIES

N.Yu. Zamjatina¹, E.A. Kotov², R.V. Goncharov³, A.V. Burceva⁴, V.I. Grebenets⁵,
A.A. Medvedkov⁶, V.A. Molodtsova⁷, V.P. Klyueva⁸, Yu.V. Kul'chitskii⁹, B.A. Mironova¹⁰,
B.V. Nikitin¹¹, A.N. Pilyasov¹², A.E. Polyachenko¹³, A.V. Poturaeva¹⁴, D.A. Streletskii¹⁵,
I.A. Shamalo¹⁶

^{1, 5, 6, 11, 12, 14, 16} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

^{2, 3, 7, 9, 13} HSE University

⁴ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Engineering Pedagogy,
Psychology and Applied Linguistics

^{8, 15} Tyumen Scientific Center SB RAS

¹⁰ Analytical Center of the ANO "Moscow Urban Forum"

¹ Department of socio-economic geography of foreign countries, Associate Professor, Ph.D. in Geography;
e-mail: nadezam@mail.ru

² Faculty of Urban and Regional Development / Vysokovsky Graduate School of Urbanism, Senior Lecturer, Scientific
Researcher; e-mail: ekotov@hse.ru

³ Faculty of Urban and Regional Development / Vysokovsky Graduate School of Urbanism, Associate Professor,
Ph.D. in Geography; e-mail: rgoncharov@hse.ru

⁴ Associate Professor, Ph.D. in Pedagogy; e-mail: alexandraburtseva@yandex.ru

⁵ Department of Cryolithology and Glaciology, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: vgreb@inbox.ru

⁶ Department of World Physical Geography and Geoecology, Associate Professor, Ph.D. in Geography;
e-mail: a-medvedkov@bk.ru

⁷ Faculty of Urban and Regional Development / Vysokovsky Graduate School of Urbanism, Lecturer, Junior Researcher;
e-mail: vmolodtsova@hse.ru

⁸ Institute of Problems of the Development of the North, sector of Social Anthropology, Leading Scientific Researcher,
Ph.D. in History; e-mail: vormpk@gmail.com

⁹ Faculty of Urban and Regional Development / Vysokovsky Graduate School of Urbanism,
Lecturer; e-mail: kulchitsky@hse.ru

¹⁰ Analyst; e-mail: Mironova@mosurbanforum.ru

¹¹ Department of socio-economic geography of foreign countries, postgraduate student; e-mail: borisnikitin25@gmail.com

¹² Department of socio-economic geography of foreign countries, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: pelyasov@mail.ru
¹³ Faculty of Economic Sciences, master student; e-mail: apolyachenko@gmail.com

¹⁴ Department of socio-economic geography of foreign countries, postgraduate student; e-mail: av-poturaeva@yandex.ru

¹⁵ Institute of the Earth's Cryosphere, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: strelets@udel.edu

¹⁶ Department of socio-economic geography of foreign countries, postgraduate student; e-mail: vshamalo@rambler.ru

Resilience is the ability of urban systems to overcome natural or manufactured crises. It is regarded as a complementary concept to that of sustainable development. Application of the concept of resilience is particularly relevant in the Arctic, where both natural and economic systems are particularly vulnerable. The article analyzes 19 quantitative indicators for 27 Arctic settlements of the Russian Federation according to the following subsystems: economic specialization, life support and communal services, socio-cultural, natural-ecological, administrative and managerial. Cluster analysis identified 7 groups of cities that consistently demonstrate similarity under different versions of analysis. Overcoming crises in a city development requires simultaneous resilience in different subsystems of urban development; the weakness of any of these subsystems could cause the collapse of the entire system. Therefore, the assessment of resilience requires an integrated approach.

Keywords: sustainable development, Arctic cities, socio-ecological systems

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-60088 "Urban Arctic resilience in the context of climate change and socio-economic transformation").

REFERENCES

- Arctic Resilience Report, M. Carson and G. Peterson (eds.), Stockholm Environment Institute and Stockholm Resilience Centre, Stockholm, 2016, 218 p.
- Arctic Social Indicators – a follow-up to the Arctic Human Development Report, J.N. Larsen, P. Schweitzer, and G. Fondahl (eds.), Nordic Council of Ministers, Copenhagen, 2010, 159 p.
- Baburin V.L., Badina S.V., Goryachko M.D., Zemtsov S.P., Koltermann K.P. Otsenka uyazvimosti sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Arkticheskoi territorii Rossii [Vulnerability assessment of the socio-economic development of the Russian Arctic territories], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 6, p. 71–77. (In Russian)

- Baburin V.L., Zemtsov P.P. Evolyutsiya sistemy gorodskikh poselenii i dinamika prirodnikh i sotsial'no-ekonomicheskikh protsessov v Rossiiskoi Arktike [Evolution of the urban settlement system and the dynamics of natural and socio-economic processes in the Russian Arctic], *Regional'nye issledovaniya*, 2015, vol. 50, no. 4, p. 76–83. (In Russian)
- Collier F., Hambling J., Kernaghan S. et al. Tomorrow's cities: a framework to assess urban resilience, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Urban Design and Planning*, 2014, vol. 167(2), p. 79–91, DOI: 10.1680/udap.13.00019.
- Council A. *Arctic resilience report*. Stockholm Environment Institute and Stockholm Resilience Centre, 2016.
- Fiala D. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation, *Int. Journal of Biometeorol.*, 2012, no. 56, p. 429–441.
- Fingleton B., Garretsen H., Martin R. Recessionary Shocks and Regional Employment: Evidence on the Resilience of UK Regions, *Journal of Regional Science*, 2012, vol. 52, no. 1, p. 109–133.
- Giannakis E., Bruggeman A. Economic crisis and regional resilience: Evidence from Greece, *Papers in Regional Science*, 2017, vol. 96, no. 3, p. 451–476.
- Goncharov R.V., Dan'kin M.A., Zamyatina N.Yu. Molodtsova V.A. Sobory v pustyne ili opornye bazy? Raznoobrazie gorodov i poselkov Rossiiskoi Arktiki po kharakteru vzaimosvyazei s okruzhayushchei territoriei [Cathedrals in the desert or support bases? The diversity of cities and towns of the Russian Arctic by the nature of relationships with the surrounding territory], *Gorodskie issledovaniya*, 2021, vol. 5, no. 1, p. 33–56, DOI: 10.17323/usp51202033-56. (In Russian)
- Holling C.S. Resilience and Stability of Ecological Systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, vol. 4, p. 1–23.
- Hopkins R. *The Transition Handbook: From Oil Dependency to Local Resilience*, Totnes, Devon, Green Books Ltd, 2018, 340 p.
- Isachenko A.G. *Vvedenie v ekologicheskuyu geografiyu* [Introduction to ecological geography], SPb., SPbGU, 2003, 192 p. (In Russian)
- Klimanov V., Kazakova S., Mikhaylova A. Economic and Fiscal Resilience of Russia's Regions, *Regional Science Policy and Practice*, 2020, vol. 12, iss. 4, p. 627–640.
- Kumo K., Litvinenko T.V. Instability and stability in the population dynamics of Chukotka and its settlements in the post-soviet period: Regional features and intraregional and local differences, *Regional Research of Russia*, 2020, vol. 10, no. 1, p. 71–85.
- Maaten L.V.D., Hinton G. Visualizing Data using t-SNE, *Journal of Machine Learning Research*, 2008, vol. 9, p. 2579–2605.
- Maddi S., Khoshaba D. *Resilience at work*, New York, Amazon, 2005, 240 p.
- Martin R. Regional economic resilience, hysteresis and recessionary shocks, *Journal of Economic Geography*, 2012, vol. 12, no. 1, p. 1–32.
- McInnes L., Healy J., Melville J. *UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction*, 2018, DOI: 10.48550/ARXIV.1802.03426.
- Natsional'nyi atlas Rossii, t. 2, *Priroda. Ekologiya* [National Atlas of Russia, vol. 2, Nature, Ecology], A.V. Borodko, V.V. Sveshnikov et al. (eds.), Moscow, Roskartografiya Publ., 2007, 496 p. (In Russian)
- Pilyasov A.N., Kolesnikova O.V. Otsenka tvorcheskogo potentsiala rossiiskikh regional'nykh soobshchestv [Assessment of the creative potential of Russian regional communities], *Voprosy ekonomiki*, 2008, no. 9, p. 50–69. (In Russian)
- Polyachenko A. Regional Resilience of Russian Arctic Cities, *ERSA Abstract Book*, 2019, p. 346.
- Scrucca L., Fop M., Murphy T.B., Raftery A.E. Mclust 5: Clustering, Classification and Density Estimation Using Gaussian Finite Mixture Models, *The R Journal*, 2016, vol. 8(1), p. 205–233, DOI: 10.32614/RJ-2016-021.
- Smirnov A.V. Chelovecheskoe razvitiye i perspektivy formirovaniya ekonomiki znaniy v Rossiiskoi Arktike [Human development and prospects for the formation of the knowledge economy in the Russian Arctic], *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2020, no. 2(38), p. 18–30, DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-18-30. (In Russian)
- Sovremennye izmeneniya v litosfere pod vliyaniem prirodnikh i antropogennykh faktorov* [Modern changes in the lithosphere under the influence of natural and anthropogenic factors], V.I. Osipov, A.L. Yanshin et al. (eds.), Moscow, Nedra Publ., 1996, 222 p. (In Russian)
- Vinogradova V.V. Teplovoe vozdeistvie na territorii Rossii v seredine XXI veka po model'nym dannym [Thermal impact on the territory of Russia in the middle of the 21st century according to model data], *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2020, vol. 84, no. 3, p. 404–413. (In Russian)
- Vlasova T., Petrov A.N., Volkov S. Rethinking Sustainability Monitoring in the Arctic by Linking Resilience and Sustainable Development in Socially-Oriented Observations: A Perspective, *Sustainability*, 2021, vol. 13(1), p. 177, DOI: 10.3390/su13010177.
- Zamyatina N.Yu. Razvilki sud'by frontirnogo goroda: uroki Igarki [The forks of the fate of a frontier city: the lessons of Igarka], *EKO*, 2021, no. 1, p. 67–92. (In Russian)
- Zamyatina N.Yu., Goncharov R.V. Arkticheskaya urbanizatsiya: fenomen i sravnitel'nyi analiz [Arctic urbanization: a phenomenon and a comparative analysis], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geografiya*, 2020, no. 4, p. 69–82. (In Russian)
- Zamyatina N.Yu., Medvedkov A.A., Polyachenko A.E., Shmallo I.A. Zhiznestoikost' arkticheskikh gorodov: analiz podkhodov [Resilience of Arctic cities: analysis of approaches], *Vestn. Sankt-Peterburgskogo un-ta, Nauki o Zemle*, 2020, vol. 65, no. 3, p. 481–505, DOI: 10.21638/spbu07.2020.305. (In Russian)
- Zamyatina N., Goncharov R. Arctic urbanization: resilience in a condition of permanent instability. The case of Russian Arctic cities, *Resilience and Urban Disasters Surviving Cities. New Horizons in Regional Science series*, K. Borsekova, P. Nijkamp (eds.), UK, Edward Elgar Publishing Ltd, 2018, p. 136–154.
- Zamyatina N.Yu., Pilyasov A.N. *Innovatsionnyi poisk v monoprofil'nykh gorodakh: blokirovki razvitiya, novaya promyshlennaya politika i dorozhnaya karta peremen* [Innovative search in single-industry cities: development blocks, new industrial policy and a roadmap for change], Moscow, URSS Publ., 2015, 216 p. (In Russian)
- Zhikharevich B.P., Klimanov V.V., Maracha V.G. Shokoustoichivost' territorial'nykh sistem: kontseptsiya, izmerenie, upravlenie [Shock resistance of territorial systems: concept, measurement, management], *Regional'nye issledovaniya*, 2020, no. 3, p. 4–15, DOI: 10.5922/1994-5280-2020-3-1. (In Russian)

Web sources

Kotov E., Clustering of Russian Arctic Cities: data, R code and plots, 2022, URL: <https://github.com/e-kotov/ru-resilient-arctic-clusters>, Zenodo, DOI: 10.5281/zenodo.6484062 (access date 09.03.2021).

Ustoichivost' arkticheskikh gorodov [Sustainability of Arctic cities], Sait proekta Grant RFFI 18-05-60088 Ustoichivost'

razvitiya Arkticheskikh gorodov v usloviyakh prirodno-klimaticheskikh izmenenii i sotsial'no-ekonomicheskikh transformatsii [Website of the RFBR Grant project 18-05-60088 Sustainability of the development of Arctic cities in the conditions of natural and climatic changes and socio-economic transformations], URL: <https://www.resilient-arctic-urban.space/> (access date 09.03.2021).

Received 09.03.2021

Revised 15.11.2021

Accepted 09.03.2022

СТРУКТУРА АРЕАЛОВ БОРЕАЛЬНЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ЛИННЕИ СЕВЕРНОЙ И МАЙНИКА ДВУЛИСТНОГО В ПРЕДЕЛАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ

Н.Б. Леонова¹, И.Н. Горяинова², М.В. Бочарников³

^{1–3} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, кафедра биогеографии

¹ Канд. геогр. наук, доц.; e-mail: nbleonova2@gmail.com

² Канд. геогр. наук; e-mail: info@biogeo.ru

³ Канд. геогр. наук, доц.; e-mail: maxim-msu-bg@mail.ru

Приведены результаты исследования структуры ареалов двух видов растений наземного покрова бореальных лесов: линнеи северной и майника двулистного в пределах восточно-европейской части их распространения. В качестве показателя активности видов в пределах ареала использованы данные об их постоянстве в массивах геоботанических описаний. Проанализировано более 7000 геоботанических описаний из научных публикаций и собственных полевых исследований; данные были сгруппированы в 109 выборок по географической приуроченности, для каждой выборки рассчитаны показатели постоянства, а именно доля описаний с участием исследуемого вида. На основе использования методов геостатистики (ординарного кригинга) построены модели пространственного распределения показателя постоянства каждого вида в пределах восточно-европейской части ареала. Проверка качества построенных моделей методом кросс-валидации и оценка достоверности регрессий между исходными и предсказанными значениями постоянства дали удовлетворительные результаты. Анализ связи построенных моделей распространения показателей постоянства с биоклиматическими характеристиками показал относительно слабую связь с показателями тепло- и влагообеспеченности, что говорит о сложном характере взаимовлияния климатических, орографических, литологических и фитоценологических факторов на распределение исследуемых видов растений. Причем более сильные взаимосвязи с лесообразующими породами в распределении показаны для линнеи северной, тогда как майник двулистный связан с более широким набором формаций и в большей степени обнаруживает зависимость от определенного уровня теплообеспеченности и количества летних осадков. Область максимального постоянства майника двулистного в Европейской России связана с центральной и западной частями Ладожско-Вычегодского южнотаяжного и Смоленско-Приволжского широколиственно-хвойнолесного биомов, где он произрастает в еловых, хвойно-широколиственных и мелколиственных лесах. Области максимального постоянства линнеи северной, согласно модели, располагаются в центральной части Ладожско-Вычегодского среднетаяжного и на западе Приуральского таяжного биомов, где вид преимущественно произрастает в наземном покрове еловых лесов. Выявленные закономерности могут быть использованы для отображения структуры ареала вида на карте, для выявления внутрибиомной дифференциации растительного покрова, для мониторинга биоразнообразия бореальных лесов Европейской России при изменениях окружающей среды.

Ключевые слова: карты ареалов, биом, кригинг, моделирование распространения видов, постоянство видов

ВВЕДЕНИЕ

Изучение структуры ареала является важной биогеографической задачей, решение которой позволяет выявить основные закономерности распространения вида в свете географических, исторических и эколого-ценотических факторов [Толмачев, 1974; Куваев, 1980; Мордкович, 2005]. Выявление структуры ареала признано необходимым в организации мониторинга биологического разнообразия в рамках крупных подразделений биотического покрова [Носова и др., 2004; Юрцев, 1992, 2006]. При относительной разработанности карт структуры ареалов в зоогеографии, где используются показатели численности и активности вида животных [Емельянова, 2012], опыт картографического

отражения пространственной организации ареалов растений достаточно редок в современных исследованиях [Мяло, Горяинова, 1997; Емельянова, Леонова, 2016]. Для составления карты структуры ареала вида растения могут быть использованы сведения об изменении его ценотической роли в пределах ареала [Толмачев, 1974], о распределении создаваемой им фитомассы [Куваев, 1980], о региональной активности [Юрцев, 2006]. В современной литературе проблема активности видов растений рассматривается достаточно широко и с различных позиций: их фитоценотической роли [Grime, Pierce, 2012; Kosakivska, 2007], преуспеваемости в ландшафте [Дидух, 1982; Юрцев, 2006; Чепинога, Росбах, 2008], роли в экосистемных процессах [Са-

винов, Никитин, 2017]. Для оценки активности используют показатели постоянства или встречаемости вида, его массовости или обилия (проективного покрытия), широты экологической амплитуды [Дидух, 1982; Налимова, 2006]. В нашем исследовании распределение популяций двух бореальных видов наземного покрова в пределах восточно-европейской части их ареалов проанализировано на основе постоянства вида в сообществах и отображения этого показателя на карте с помощью методов пространственного моделирования. Эколого-ценотические особенности распространения данных видов растений в подзонах европейской тайги и на севере ареалов были подробно рассмотрены нами ранее [Леонова, Горяинова, 2016, 2018].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа были выбраны типичные бореальные виды растений – представитель мелкотравья травянистый многолетник майник двулистный *Maianthemum bifolium* (L.) F. Schmidt сем. Asparagaceae и стелящийся вечнозеленый кустарничек линнея северная *Linnaea borealis* L. сем. Cnaginaceae. Оба растения обладают обширными циркумбореальными ареалами, причем майник на европейской территории России распространен от лесотундры до лесостепи, а у линнеи северная граница простирается до тундровой зоны, а южная лежит в пределах подтаежной зоны [Толмачев, 1974]. Оба вида обладают адаптациями к существованию в бореальных лесах, встречаются в лесных таежных сообществах с высоким постоянством и заметным обилием, иногда играя роль доминанта. По этим критериям они могут служить индикаторами оценки состояния экосистем, в том числе и для оценки биоразнообразия [Global..., 1995].

Для подсчета постоянства были использованы данные научных публикаций разных лет по растительности из различных районов европейской территории России (от северной тайги до подзоны лесостепи), содержащих полные геоботанические описания (более 6700 описаний из 120 источников), также данные многолетних исследований авторов в Устьянском районе Архангельской области и Кандакшском районе Мурманской области (350 описаний). По собранным материалам была составлена база данных, используемая в дальнейшем для моделирования ареалов. В базе данных указаны местонахождения сообществ с участием исследуемых видов растений из разных районов, их географические координаты, число описаний в каждой выборке, показатели постоянства обоих видов в абсолютном выражении и в процентах, принадлежность к зоне/подзоне растительности [Зоны..., 1999],

дается указание на формационный состав лесных сообществ, ссылка на источник данных. Под постоянством вида в работе понимается доля его участия в массивах описаний той или иной территории [Нешатаев, 1987].

Выявление пространственной организации данных основано на методах геостатистики, позволяющих перейти от локализованных точечных данных к непрерывным покрытиям. Полученные пространственные модели на следующем этапе исследований дают возможность перейти к оценке связей изучаемых характеристик с биотическими и абиотическими условиями. Исследований, оперирующих количественными фитоценотическими показателями, в настоящее время немного, что связано с большей трудоемкостью как полевого сбора геоботанических материалов, так и со сложностью соблюдения более строгих требований к представлению данных для анализа (равномерное распределение, достаточно высокая плотность сети исследований, добавление точек вне изучаемой территории) [Попов, 2017].

Для построения пространственных моделей распределения показателей постоянства все данные по массивам геоботанических описаний были сгруппированы в 109 выборок, или ключевых участков по географической приуроченности на основе близости географических координат (рис. 1). В каждый участок попали выборки геоботанических описаний из разных источников в количестве не менее 10–20 описаний на выборку. Для каждого такого участка рассчитаны показатели постоянства исследуемых видов. Дополнительно, в соответствии с требованиями к отображению точек наблюдений, для предотвращения ошибок экстраполяции включены еще три ключевых участка за пределами ареалов видов с нулевым постоянством. Поэтому всего при пространственном моделировании использовано 112 ключевых участков («точки наблюдений»), представленных в виде векторного слоя с приведенными характеристиками для обоих видов в атрибутивной таблице.

Оценка пространственной дифференциации данных проведена с использованием методов геостатистики на основе ординарного кригинга [Демьянов, Савельева, 2010]. Данные о постоянстве видов, изначально представленные в процентах, переведены в 5-балльную шкалу (с равномерным шагом через 20%), положение на которой рассматривается в качестве критерия активности вида. Выполнение анализа методом ординарного кригинга со сферической вариограммой для майника двулистного и линнеи северной проведено по единому алгоритму:

– проведение интерполяции показателя постоянства на исследуемую территорию с использованием

функции квадратичного уравнения регрессии с переводом значений порядковой шкалы в непрерывную;

– создание растровых моделей предсказанного постоянства с разрешением, соответствующим разрешению растровых слоев глобальной климатической модели Chelsa;

– проверка качества построенных моделей методом кросс-валидации, оценка достоверности регрессий между исходными и предсказанными значениями постоянства.

Климат использован в качестве ключевого фактора, важнейшие показатели которого определяют зональные, подзональные и региональные черты пространственной организации растительного покрова, а также отдельных компонентов биоты [Роров, 2018]. Среди биоклиматических показателей, играющих важную роль в функционировании экосистем, использованы стандартные показатели глобальной климатической модели Chelsa [Karger et al., 2017]. В их число входят как исходные, так и рассчитанные показатели, характеризующие средние многолетние характеристики тепло- и влагообеспеченности: средние годовые, средние за летние месяцы и июль температуры и количество осадков, омбротермические индексы лета и июля (отношение суммы осадков к средней температуре за данные периоды). В качестве дополнительного

фактора использована абсолютная высота, характеризующая макроструктурные особенности территории. Растровый формат исходных данных, а также созданных моделей предсказанного постоянства линии северной и майника двулистного в едином пространственном разрешении позволил реализовать методы корреляционного и регрессионного анализа для выявления обусловленности климатическими условиями ценотической роли видов. Подготовленные девять биоклиматических показателей использованы в анализе в качестве переменных с непрерывными значениями. Построение функции ценотической роли видов от данных переменных и проверка объясняющей способности полученных уравнений послужило основным способом выявления пространственных закономерностей в участии видов в растительном покрове.

Работа с цифровыми материалами и проведение статистических операций выполнены в программах ArcGis 10.0, Saga 2.1.4 и Statistica 12.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученная интерполяционная модель постоянства *майника двулистного* *Maianthemum bifolium* отражает его распределение в растительных сообществах в восточно-европейской части ареала вида.

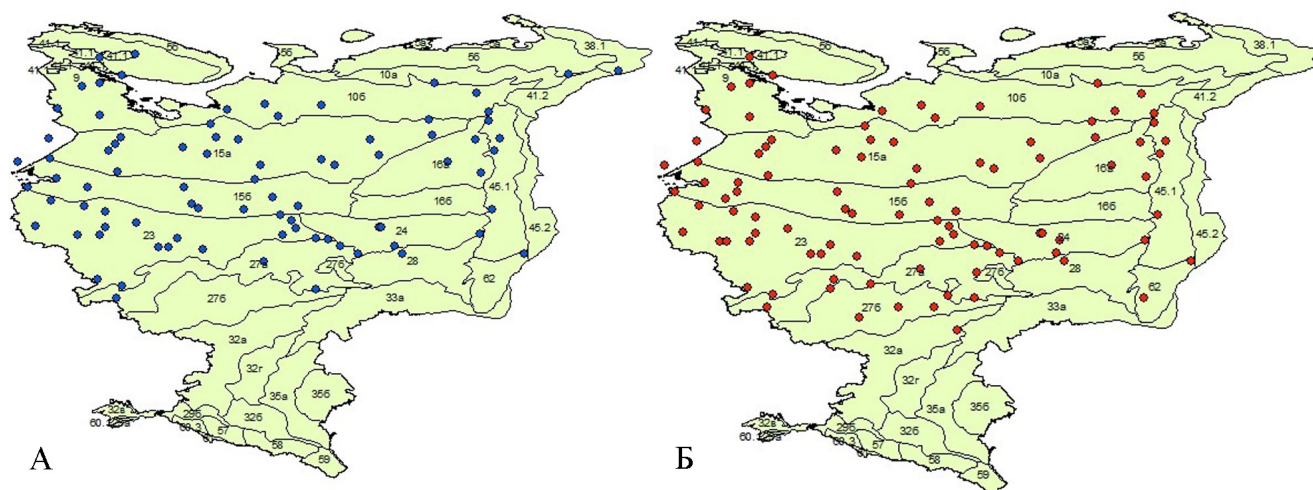


Рис. 1. Точки использованных в исследовании массивов описаний:

А – с участием *Linnaea borealis*; Б – с участием *Maianthemum bifolium* в границах биомов:

9 – Кольско-Карельский гипоарктическо-таежный; 10 – Мезено-Печорский гипоарктическо-таежный: а – лесотундровый; б – северотаежный; 15 – Ладожско-Вычегодский: а – среднетаежный; б – южнотаежный; 16 – Приуральский: а – среднетаежный; б – южнотаежный; 23 – Смоленско-Приволжский широколиственно-хвойнолесной; 27 – Днепровско-Приволжский: а – широколиственнолесной; б – лесостепной; 28 – Заволжский лесостепной; 32 – Причерноморско-Приволжский степной; 45 – Среднеуральский таежный; 62 – Южноуральский лесостепной. Номера биомов по [Биомы России, 2018]

Fig. 1. Points of geobotanic descriptions used in the study:

А – with *Linnaea borealis*; Б – with *Maianthemum bifolium* within biomes:

9 – Kola-Karelian hypoarctic boreal; 10 – Mezen-Pechora hypoarctic boreal: a – forest-tundra; б – northern taiga; 15 – Ladoga-Vychegda a – middle taiga; б – southern taiga; 16 – Near-Urals: a – middle taiga; б – southern taiga; 23 – Smolensk-Volga deciduous-coniferous forest; 27 – Dnepr-Volga: a – deciduous forest; б – forest-steppe; 28 – Trans-Volga forest steppe; 32 – Black Sea-Volga steppe; 45 – Middle-Urals boreal; 62 – South-Urals forest steppe (numbers of biomes according to: [Biomes of Russia, 2018])

Модель, надежность которой определена рядом показателей ($R^2 = 0,63$, $F = 188,85$, $p < 0,000$), имеет заниженные значения постоянства вида по сравнению с расчетными по данным кросс-валидации (значения модельного постоянства не превышают 4 баллов, тогда как расчетное постоянство достигает 5 баллов) (рис. 2).

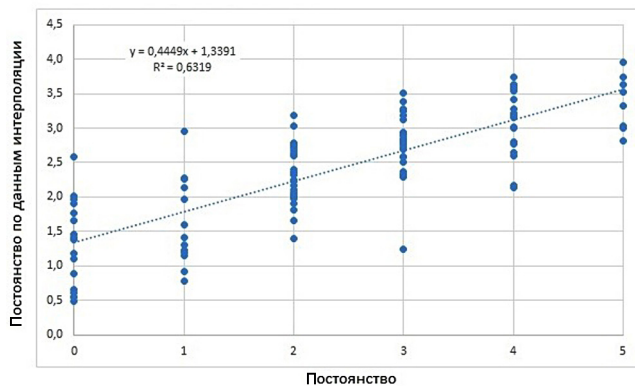


Рис. 2. Кросс-валидация интерполяционной модели постоянства майника двулистного по 112 ключевым участкам

Fig. 2. Cross-validation of an interpolation constancy model of the constancy of *Maianthemum bifolium* for 112 key areas

В пространственной структуре распределения показателя постоянства *Maianthemum bifolium* выражены как зональные, так и региональные черты дифференциации (рис. 3). Повышенное постоянство вида отмечается в центральной и западной частях подзон средней, южной тайги, зоны хвойно-широколиственных лесов на Восточно-Европейской равнине (Ладожско-Вычегодский южнотаежный и Смоленско-Приволжский широколиственно-хвойнолесной биомы). Область повышенного постоянства вытянута в субширотном направлении, достигая западных рубежей Приуральского таежного биома. К северу от этой полосы, в лесотундровой, и к югу – в широколиственнолесной зонах вид встречается спорадически, с низким постоянством в растительном покрове.

Такой характер пространственной структуры постоянства майника дает основание предполагать выраженность влияния климатических показателей, имеющих широтный градиент в своем изменении. Область наибольшего постоянства вида приходится на центральную часть рассматриваемого ареала, где такие показатели имеют средние значения. Квадратичным уравнением регрессии достоверно описываются связи модельного постоянства вида с несколькими показателями тепло- и влагообеспеченности (табл. 1). Наиболее тесная связь отмечается для средней температуры лета, при значениях которой около $+17...+18^{\circ}\text{C}$ модельное постоянство

вида максимально. Тяготение области максимального постоянства вида к западной части ареала в пределах Восточно-Европейской равнины, очевидно, объясняется и ростом увлажнения с востока на запад. Среди показателей влагообеспеченности наиболее тесные связи отмечаются для количества летних осадков (на области с увлажнением около 250 мм в летний период приходится наибольшее модельное постоянство вида).

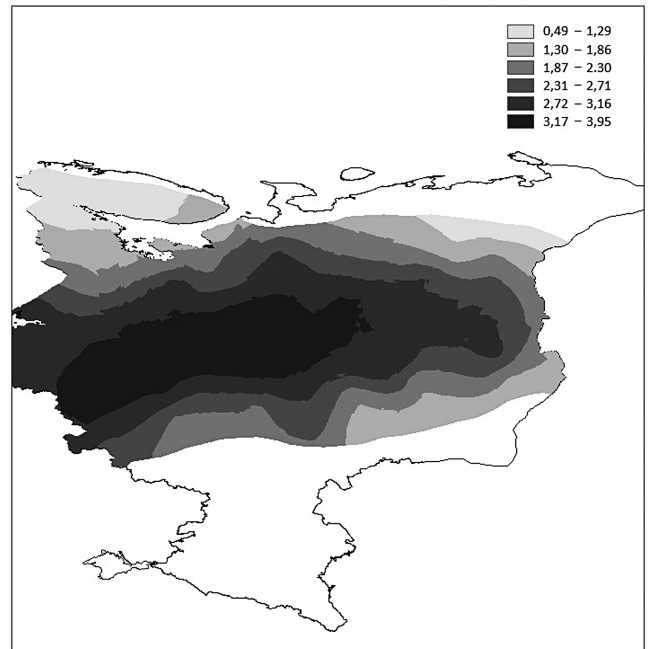


Рис. 3. Интерполяционная модель постоянства майника двулистного

Fig. 3. Interpolation constancy model for *Maianthemum bifolium*

Полученная интерполяционная модель постоянства *Linnaea borealis* в растительных сообществах отражает более сложный характер ее пространственного распределения. Модель характеризуется заниженными значениями постоянства вида по сравнению с расчетными (максимальные значения не превышают 3,5) при достаточно высоком качестве, определенном по данным кросс-валидации (коэффициент детерминации равен 0,67) (рис. 4). По результатам регрессионного анализа выявлена достоверная связь между рассчитанными и модельными значениями постоянства ($F = 220,57$, $p < 0,000$).

Пространственная структура показателей постоянства *Linnaea borealis* на модели характеризуется как зональными, так и региональными чертами дифференциации (рис. 5). Повышенное постоянство вида отмечается в среднетаежной подзоне таежной зоны с двумя выраженными областями с максимальным уровнем постоянства. В южной части ареала вид, встречаясь спорадически на обширной терри-

тории, имеет низкое постоянство. В северной части ареала вид доходит до побережья Баренцева и Карского морей, с небольшим постоянством встречаясь в растительном покрове лесотундры и тундровой зоны. Сложный характер пространственной струк-

туры распределения постоянства линеи северной в пределах Европейской России определен как широтным градиентом климатических условий, так и влиянием региональных особенностей в географии ботанического разнообразия биомов.

Таблица 1

Связь модельного постоянства майника двулистного с биоклиматическими показателями

Биоклиматические показатели	Коэффициент линейной корреляции Спирмена	Уравнение регрессионной модели с наибольшим показателем R ²	Коэффициент детерминации регрессионной модели (R ²)
Средняя температура летних месяцев	0,38	$y = -0,0495x^2 + 1,7441x - 12,647$	0,44
Средняя температура июля	0,39	$y = -0,0507x^2 + 1,8824x - 14,765$	0,42
Среднее количество осадков летних месяцев	0,59	$y = -0,0001x^2 + 0,0661x - 5,9566$	0,33
Среднее годовое количество осадков	0,52	$y = -254330x^2 + 0,0353x - 9,3745$	0,31
Средняя годовая температура	0,45	$y = -0,0132x^2 + 0,1991x + 2,1282$	0,28
Среднее количество осадков июля	0,55	$y = -0,0008x^2 + 0,1597x - 4,6285$	0,28
Годовая амплитуда температур	-0,19	$y = -0,0002x^2 + 0,1775x - 29,186$	0,22

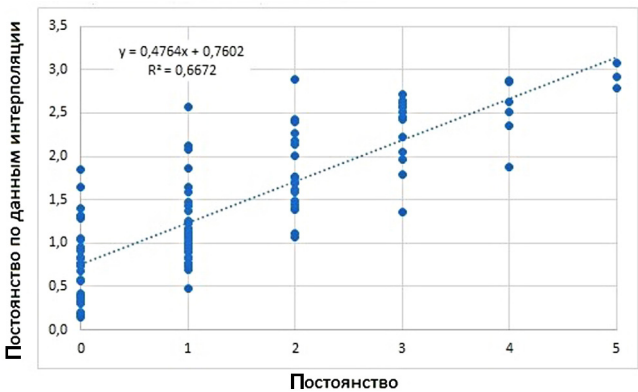


Рис. 4. Кросс-валидация интерполяционной модели постоянства линеи северной по 112 ключевым участкам

Fig. 4. Cross-validation of the interpolation model of the constancy of *Linnaea borealis* for 112 key areas

Анализ связи построенной модели распространения с биоклиматическими показателями показал относительно слабую связь модельного постоянства вида со средней температурой теплого периода (летние месяцы и июль) и средней годовой температурой (табл. 2). Наибольшее постоянство вида отмечается при положительной средней годовой температуре (+1...+2°C) и средней температуре лета около +16...+17°C. Данные условия характерны для центрального сектора европейской

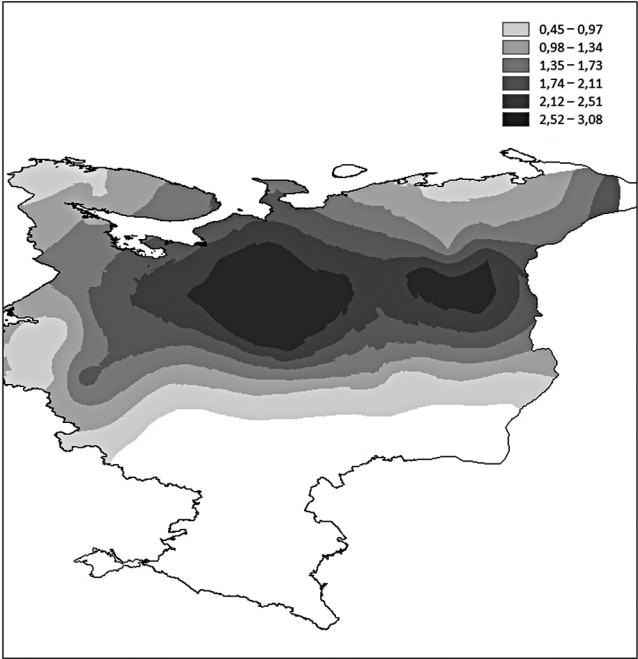


Рис. 5. Интерполяционная модель постоянства линеи северной

Fig. 5. Interpolation constancy model for *Linnaea borealis*

тайги на юге подзоны северной тайги и в средней тайге. В рамках биомного деления территории [Биомы..., 2018], территории повышенного постоянства линеи северной приурочены к Ладожско-

Вычегодскому и к Приуральскому таежным биомам (см. рис. 1).

При сравнении результатов проведенного моделирования с данными обработки показателей постоянства рассматриваемых видов по различным выборкам (для подзон, для секторов подзон, для основных лесных формаций) выявляются закономерности их пространственного распределения, которые могут служить подтверждением объективности избранного метода изучения структуры ареала.

Так, показатели постоянства для подзон растительности характеризуются максимальными значениями для линнеи северной в северной и средней тайге, для майника двулистного – в южной тайге (рис. 6), что согласуется с результатами моделирования. Сопоставление экологических амплитуд обоих видов по термоклиматической шкале Д. Н. Цыганова также подтверждает более высокие требования к теплообеспеченности для майника: баллы от бореального до неморального включительно, а для лин-

неи – от гипоарктического до суббореального климатического режима [Цыганов, 1983].

Секторальное изменение постоянства обоих видов с запада на восток обусловлено как климатическими показателями (усиление континентальности, уменьшение осадков), так и разнообразием орографических, литологических и биотических условий. Анализ показателей постоянства майника двулистного, рассчитанных по выборкам, выявил, что наибольшее постоянство характерно для лесов западного и центрального секторов (до 60–70%), а именно лесов Смоленско-Московской и Валдайской возвышенностей, Верхне-Волжской низменности (см. рис. 3). Анализ изменения постоянства линнеи по массивам описаний в меридиональном направлении показал, что максимальные показатели характерны для Двинско-Мезенской равнины (более 40%) в северной тайге и для Вычегодской равнины (около 60%) в средней тайге, что также не противоречит результатам моделирования (см. рис. 5).

Таблица 2

Связь модельного постоянства линнеи северной с биоклиматическими показателями

Биоклиматические показатели	Коэффициент линейной корреляции Спирмена	Уравнение регрессионной модели с наибольшим показателем R^2	Коэффициент детерминации регрессионной модели (R^2)
Средняя температура летних месяцев	–0,20	$y = -0,0463x^2 + 1,3554x - 7,9171$	0,27
Средняя температура июля	–0,19	$y = -0,0466x^2 + 1,4516x - 9,3473$	0,23
Средняя годовая температура	–0,28	$y = -0,0242x^2 - 0,0121x + 1,9353$	0,22

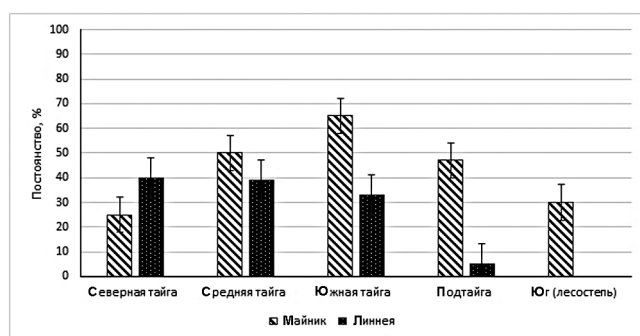


Рис. 6. Изменение постоянства майника двулистного и линнеи северной в лесных сообществах Европейской России в широтном направлении

Fig. 6. Latitudinal changes of constancy indices for *Maianthemum bifolium* and *Linnaea borealis* in European Russia forests

Проведенный регрессионный анализ не установил связи показателей постоянства линнеи с увлажнением, и в целом связи распространения этого

вида с климатическими показателями значительно слабее выражены (см. табл. 2). Это можно объяснить действием других факторов, перекрывающих воздействие климата. Можно предположить, что для лесных растений нижнего яруса более важным экологическим фактором является воздействие лесообразующих пород [Толмачев, 1974]. Действительно, в однородных климатических условиях постоянство исследуемых видов значительно варьирует в разных лесных формациях. Максимальное постоянство как у майника двулистного, так и у линнеи северной приурочено к еловым лесам, за исключением окраин ареалов, где эти связи нарушаются. Для майника также обычно произрастание и в мелколиственных лесах, в то время как у линнеи постоянство в лиственных лесах заметно снижено. В результате антропогенных трансформаций растительного покрова, наблюдаемых на большей части средней и южной тайги Восточно-Европейской равнины, при замене больших площадей корен-

ных еловых лесов мелколиственными постоянно линией северной заметно снижается, в то время как у майника такого снижения не наблюдается (рис. 7). Именно поэтому в одних и тех же климатических условиях постоянно линией в лесных массивах, сильно трансформированных антропогенными воздействиями, значительно ниже, а общая картина распределения постоянства в пределах восточноевропейской части ареала не обнаруживает четких связей с уровнем теплообеспеченности и увлажнения, как у майника. Приуроченность линией к еловым лесам отражается и на полученной пространственной модели распределения постоянства вида, на которой области повышенного постоянства совпадают с территориями наибольшего распространения еловых лесов в средней тайге Ладожско-Вычегодского и Приуральского биомов. Согласно структуре этих биомов на хвойные (еловые и сосновые) леса в первом биоме приходится почти 60% площади, а во втором (еловые, пихтовые и сосновые) – более 63% площади биома [Биоразнообразие..., 2020].

Майник характеризуется более широким спектром формаций, в которых он участвует с различным постоянством, при этом наиболее высокие

показатели характерны для еловых и мелколиственных лесов в южной тайге. Именно эта территория (Ладожско-Вычегодский южнотаежный биом, Смоленско-Приволжский биом широколиственно-хвойных лесов) на пространственной модели структуры ареала выступает в качестве области повышенного постоянства майника двулистного (см. рис. 3).

ВЫВОДЫ

Анализ большого объема геоботанических описаний, собранных из литературных источников, а также данных собственных многолетних наблюдений в различных районах лесной полосы Европейской России позволил оценить региональную активность двух типичных видов наземного покрова бореальных лесов на основе показателя постоянства видов.

Показатель постоянства исследуемых видов в выборках описаний лесных сообществ был использован для выявления закономерностей распределения вида в пространстве ареала на основе построения интерполяционных моделей с применением методов геостатистики.

Полученные модели распределения показателей постоянства статистически достоверны и иллюстрируют связи рассматриваемых видов с климатическими факторами, региональными особенностями природной среды и растительного покрова, которые проявляются в биомном делении территории.

Модельное распределение исследуемых видов подтверждено сопоставлением с результатами расчета их постоянства по выборкам описаний по широтному и меридиональному градиентам, а также по формациям хвойных и лиственных лесов.

На основе полученных результатов можно констатировать, что область максимального постоянства майника двулистного в восточно-европейской части ареала связана с центральной и западной частями Ладожско-Вычегодского южнотаежного и Смоленско-Приволжского биома широколиственно-хвойных лесов. Область максимального постоянства линией северной состоит из двух частей в центре Ладожско-Вычегодского среднетаежного и на западе Приуральского среднетаежного биомов.

Зависимость распределения показателей постоянства от климатических условий более четко прослеживается для майника двулистного, для которого установлены статистически достоверные связи с уровнем теплообеспеченности (средние температуры летнего периода) и увлажнения (суммы осадков летнего периода).

Помимо климатических факторов существенную роль в распространении видов играет соотношение лесных формаций. Более сложный характер распределения областей повышенного постоянства

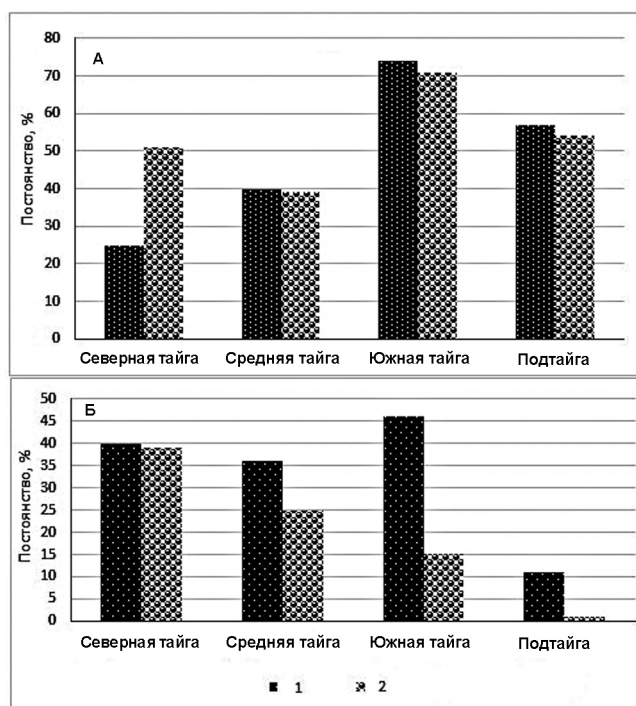


Рис. 7. Изменение постоянства майника двулистного (А) и линией северной (Б) в сообществах хвойных и лиственных лесов в широтном направлении.

Леса: 1 – хвойные; 2 – лиственные

Fig. 7. Latitudinal changing of constancy indices for *Maianthemum bifolium* (A) and *Linnaea borealis* (B) in coniferous and deciduous forests:

1 – coniferous forests; 2 – deciduous forests

линии северной в большой степени объясняется ее приуроченностью к хвойным лесам и значительной нарушенностью этих лесов в Европейской России.

Использование методов пространственного моделирования показателей постоянства дает возможность выявить в пределах восточно-европейской части ареалов двух видов наземного покрова таежных лесов области их различной активности и перейти

в дальнейшем к исследованию структуры их ареалов и картографическому ее отображению.

Выявленные закономерности могут быть использованы для мониторинга биологического разнообразия бореальных лесов Европейской России при различных изменениях окружающей среды, а также для проведения внутрибиомной дифференциации региональных биомов.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках финансирования темы НИР по госзаданию «Пространственно-временная организация экосистем в условиях изменений окружающей среды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Биомы России. Карта масштаба 1:7 500 000 / гл. ред. Г.Н. Огуреева. 2-е изд. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Русское географическое общество, WWF, 2018.
- Биоразнообразие биомов России. Равнинные биомы / под ред. Г.Н. Огуреевой. М.: ИГКЭ, 2020. 623 с.
- Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геоэстатистика: теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.
- Дидух Я.П. Проблемы активности видов растений // Ботанический журнал. 1982. Т. 67. № 7. С. 925–935.
- Емельянова Л.Г. Исследование эколого-географической структуры ареалов видов картографическими методами // Актуальная биогеография. М.: Кодекс, 2012. С. 179–192.
- Емельянова Л.Г., Леонова Н.Б. Исследование закономерностей пространственной организации ареалов видов растений и животных с использованием критерия активности и численности // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 1. С. 53–60.
- Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий. Карта для высших учебных заведений. 1:8 000 000 / отв. ред. Г.Н. Огуреева. М.: ЭКОР, 1999.
- Куваев В.Б. Горичник Морисона / Атлас ареалов ресурсов лекарственных растений СССР. М.: ГУТК, 1980. С. 59.
- Леонова Н.Б., Горяинова И.Н. Эколого-ценотические позиции *Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt и *Linnaea borealis* L. на северной периферии ареала // Вестн. Томского гос. ун-та. Биология. 2018. № 43. С. 89–110.
- Леонова Н.Б., Горяинова И.Н. Постоянство и эколого-ценотические связи майника двулистного (*Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt) и линнеи северной (*Linnaea borealis* L.) в лесах Европейской России // Вестн. Северного (Арктического) федерального ун-та. Серия: Естественные науки. 2016. № 3. С. 45–58.
- Мордкович В.Г. Основы биогеографии. М.: Тов-во научн. изданий КМК, 2005. 236 с.
- Мяло Е.Г., Горяинова И.Н. Использование показателя постоянства видов растений при картографировании структуры их ареалов // География и природные ресурсы. Вып. 3. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. С. 185–190.
- Налимова Н.В. Оценка внутриландшафтной активности популяций растений // Поливариантность развития организмов, популяций и сообществ. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2006. С. 118–123.
- Нештаев Ю.Н. Методы анализа геоботанических описаний. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. 192 с.
- Носова Л.М., Леонова Н.Б., Зимин М.В. Анализ ареалов основных эколого-ценотических групп видов растений лесного пояса // Восточно-европейские леса. Т. 1. М.: Наука, 2004. С. 270–282.
- Попов С.Ю. Использование методов геоэстатистики для моделирования ареалов видов (на примере сфагновых мхов) // Тр. Карельского научн. центра РАН. 2017. № 6. С. 70–83. DOI: 10.17076/bg558.
- Савинов А.Б., Никитин Ю.Д. Развитие представлений об активности растений, ее экологической роли и способах оценки активности в экосистемах // Принципы экологии. 2017. № 3. С. 20–39. DOI: 10.15393/j1.art.2017.6224.
- Толмачев А.И. Введение в географию растений. Л.: Наука, 1974. 224 с.
- Цыганов Д.Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. М.: Наука, 1983. 197 с.
- Чепинова В.В., Росбах С.А. Активность различных видов водной флоры Иркутско-Черемховской равнины // География и природные ресурсы. 2008. № 1. С. 97–104.
- Юрцев Б.А. Использование индексов региональной встречаемости и региональной активности для ботанико-географического анализа растительного покрова // Ботанический журнал. 2006. Т. 91. № 3. С. 375–391.
- Юрцев Б.А. Эколого-географическая структура биоразнообразия и стратегия его учета и охраны // Биоразнообразие: Подходы к изучению и сохранению. СПб.: ЗИН РАН, 1992. С. 721.
- Global Biodiversity Assessment, Oxford, Oxford Univ. Press, 1995, p. 350.
- Grime J.P., Pierce S. *The evolutionary strategies that shape ecosystems*, Chichester, Wiley-Blackwell, 2012, 240 p.
- Karger D.N., Conrad O., Böhner J., Kawohl T., Kreft H., Soria-Auza R.W., Zimmermann N.E., Linder H.P., Kessler M. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas, *Scientific Data*, 2017, no. 4, 170122, DOI: 10.5061/dryad.kd1d4.
- Kosakivska I.V. Biomarkers of plants with different types of ecological strategies, *Gen. Appl. Plant Physiol.*, 2008, vol. 34, no. 1/2, p. 113–126.

Popov S.Yu. Distribution pattern of seven *Polytrichum* species in the East European Plain and Eastern Fennoscandia, *Botanica Pacifica. A journal of plant science and conservation*, 2018, vol. 7(1), p. 25–40.

Поступила в редакцию 27.05.2021
После доработки 15.10.2021
Принята к публикации 09.03.2022

STRUCTURE OF THE AREAS OF BOREAL PLANT SPECIES WITHIN EUROPEAN RUSSIA (CASE STUDY OF NORTH TWINFLOWER AND TWO-LEAVED MULLET)

N.B. Leonova¹, I.N. Goryainova², M.V. Bocharnikov³

^{1–3} Lomonosov Moscow State University, Geography Faculty, Department of Biogeography

¹ Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: nbleonova2@gmail.com

² Ph.D. in Geography; e-mail: info@biogeo.ru

³ Senior Research Scientist, Ph.D. in Geography; e-mail: maxim-msu-bg@mail.ru

The results of studying the structure of the areas of two plant species of the boreal forests' ground cover, namely *Maianthemum bifolium* (L.) F. Schmidt. and *Linnaea borealis* L., within the East-European part of their range are discussed. Data on their presence in the geobotanical descriptions were used as an indicator of the species activity within the area. More than 7000 geobotanical descriptions from scientific publications and original surveys were analyzed; data were grouped into 109 subsets by geographic location. Constancy indicators were calculated for each subset, namely, the proportion of descriptions in which the studied species were present. Based on the use of geostatistical methods (ordinary kriging), models of the spatial distribution of the constancy index of each species within the East-European part of the range were constructed. Checking the quality of constructed models by the cross-validation method and assessing the reliability of regressions between the initial and predicted values of constancy gave satisfactory results. Analysis of the relationship between the constructed models of the distribution of constancy indicators and bioclimatic characteristics showed a relatively weak correlation with indicators of heat and moisture supply. This indicates the complex nature of the mutual influence of climatic, orographic, lithological and phytocenotic factors on the distribution of plant species under study. Moreover, the distribution of *Linnaea borealis* shows closer correlation with forest-forming species, while *Maianthemum bifolium* is associated with a wider number of formations and to a greater extent depends on a certain level of heat supply and the amount of summer precipitation. The area of maximum constancy of *Maianthemum bifolium* in European Russia is the central and western parts of the Ladoga-Vycheгда southern taiga and Smolensk-Volga deciduous-coniferous biomes, where it mainly grows in spruce, coniferous-deciduous and small-leaved forests. According to the model, the areas of maximum constancy of *Linnaea borealis* are the central part of the Ladoga-Vycheгда middle taiga and the west of the Urals taiga biomes, where the species predominantly grows in the ground cover of spruce forests. The revealed results could be used to display the structure of a species range on a map, to identify inner biome differentiation of the vegetation cover, and to monitor the biodiversity of boreal forests in European Russia under environmental changes.

Keywords: distribution maps, biome, kriging, modeling of species distribution, constancy of species

Acknowledgements. The study was carried out within the framework of the state-financed Scientific Research Theme “Spatial and temporal organization of ecosystems under environmental changes”.

REFERENCES

- Biomes of Russia*, Scale 1:7 500 000 (Second revised edition), G.N. Ogureeva (ed.), Moscow, Lomonosov Moscow State University, Russian Geographical Society, WWF-Russia Publ., 2018.
- Bioraznoobrazie biomy Rossii. Ravninnye biomy* [Biodiversity of biomes of Russia. Plain biomes], G.N. Ogureeva (ed.), Moscow, IGKJe Publ., 2020, 623 p. (In Russian)
- Chepinoga V.V. Rosbah S.A. Aktivnost' raznykh vidov vodnoj flory na Irkusk-Cheremukhovskoj ravnine [Activity of different aquatic flora species within the Irkutsk-Cheremukhovo Plain], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2008, no. 1, p. 97–104. (In Russian)
- Cyganov D.N. *Fitoindikacija ekologicheskikh rezhimov v podzone hvojno-shirokolistvennykh lesov* [Phytoindication of ecological regimes in the coniferous-deciduous forest subzone], Moscow, Nauka Publ., 1983, 197 p. (In Russian)
- Dem'janov V.V., Savel'eva E.A. *Geostatistika: teorija i praktika* [Geostatistics: theory and practice], Moscow, Nauka Publ., 2010, 327 p. (In Russian)

- Didukh Ja.P. Problemy aktivnosti vidov rastenij [Problems of plants species' activity], *Botanicheskii zhurnal*, 1982, vol. 67, no. 7, p. 925–935. (In Russian).
- Emel'janova L.G. Issledovanie ekologo-geograficheskoi struktury arealov vidov kartograficheskimi metodami [The study of ecological and geographical structure of species areas by cartographic methods], *Aktual'naja biogeografiya*, Moscow, Kodeks Publ., 2012, p. 179–192. (In Russian)
- Emel'janova L.G., Leonova N.B. Issledovanie zakonomenostej prostranstvennoj organizatsii arealov vidov rastenij i zhivotnykh s ispol'zovaniem kriteriya aktivnosti i chislenosti [Analysis of the regularities of spatial organization of plant and animal ranges using the activity and abundance indices], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 1, p. 53–60. (In Russian)
- Global Biodiversity Assessment*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1995, 350 p.
- Grime J.P., Pierce S. *The evolutionary strategies that shape ecosystems*, Chichester, Wiley-Blackwell, 2012, 240 p.
- Jurcev B.A. [Ecologo-geographical structure of biodiversity and the strategy for its assessment and conservation], *Bio-raznoobrazie: podhody k izucheniju i sohraneniu* [Biodiversity: approaches to survey and conservation], Saint Petersburg, ZIN RAN Publ., 1992, p. 7–21. (In Russian)
- Jurcev B.A. Ispol'zovanie indeksov regional'noj vstrechaemosti i regional'noj aktivnosti dlja botaniko-geograficheskogo analiza rastitel'nogo pokrova [Application of regional occurrence and activity indices for botanical geographical analysis of vegetation cover], *Botanicheskii zhurnal*, 2006, vol. 91, no. 3, p. 375–391. (In Russian)
- Karger D.N., Conrad O., Böhrer J., Kawohl T., Kreft H., Soria-Auza R.W., Zimmermann N.E., Linder H.P., Kessler M. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas, *Scientific Data*, 2017, no. 4, 170122, DOI: 10.5061/dryad.kd1d4.
- Zony i tipy pojasnosti rastitel'nosti Rossii i sopredel'nykh territorij*, Karta dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy [Zones and belts of vegetation in Russia and adjacent territories, Map for higher educational institutions], 1:8 000 000, G.N. Ogureeva (ed.), Moscow, ECOR Publ., 1999. (In Russian)
- Kosakivska I.V. Biomarkers of plants with different types of ecological strategies, *Gen. Appl. Plant Physiol.*, 2008, vol. 34, no. 1/2, p. 113–126.
- Kuvaev V.B. [*Peucedanum morisonii*], *Atlas arealov i resursov lekarstvennykh rastenij SSSR* [Atlas of ranges and resources of officinal plants of the USSR], Moscow, GUGK Publ., 1980, p. 59. (In Russian)
- Leonova N.B., Gorjainova I.N. Ekologo-cenoticheskie pozicii *Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt i *Linnaea borealis* L. na severnoj periferii areala [Ecological and coenotic position of *Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt and *Linnaea borealis* L. at the northern periphery of the range], *Tomsk State University Journal of Biology*, 2018, no. 43, p. 89–110. (In Russian)
- Leonova N.B., Gorjainova I.N. Postojanstvo i ekologo-cenoticheskie svyazi majnika dvulistnogo (*Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt) i linnei severnoj (*Linnaea borealis* L.) v lesah Evropejskoj Rossii [Constancy index and ecological and coenotic interactions of *Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt and *Linnaea borealis* L. in forests of European Russia], *Vestn. of Northern (Arctic) Federal University, Ser. Natural Sciences*, 2016, no. 3, p. 45–58. (In Russian)
- Mjalo E.G., Gorjainova I.N. Ispol'zovanie pokazatelya postojanstva vidov rastenij pri kartografirovanii struktury ih arealov [Application of constancy index of plants species for mapping the structure of their ranges], *Geografija i prirodnye resursy*, 1997, vyp. 3. Novosibirsk, SO RAN Publ., p. 185–190. (In Russian)
- Mordkovich V.G. *Osnovy biogeografii* [Basics of Biogeography], Moscow, KMK Publ., 2005, 236 p. (In Russian)
- Nalimova N.V. [Evaluation of intra-landscape activity of plant populations], *Polivariantnost' razvitiya organizmov, populyaciy i soobschestv*, Yoshkar-Ola, Marijskij Universitet Publ., 2006, p. 118–123. (In Russian)
- Neshataev Ju.N. *Metody analiza geobotanicheskikh opisanij* [Methods of analysis of geobotanical descriptions], Leningrad, Leningrad State University Publ., 1987, 192 p. (In Russian)
- Nosova L.M., Leonova N.B., Zimin M.V. [Analysis of ranges of the main ecological coenotic groups of plants species within the forest belt], *Vostochno-evropejskie lesa* [Eastern European forests], vol. 1, Moscow, Nauka Publ., 2004, p. 270–282. (In Russian)
- Popov S.Ju. Ispol'zovanie metodov geostatistiki dlja modelirovaniya arealov vidov (na primere sfagnovykh mhov) [Application of geostatistic methods for species ranges modelling], *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*, 2017, no. 6, p. 70–83, DOI: 10.17076/bg558. (In Russian)
- Popov S.Yu. Distribution pattern of seven *Polytrichum* species in the East European Plain and Eastern Fennoscandia, *Botanica Pacifica. A journal of plant science and conservation*, 2018, vol. 7(1), p. 25–40.
- Savinov A., Nikitin Y. Razvitie predstavlenii o aktivnosti rastenij, ikh ekologicheskoi roli i metodakh otzhenki v ekosistemakh [Development of concepts of plants activity, its ecological role and methods of its assessment in ecosystems], *Principy ekologii*, 2017, vol. 6, no. 3, p. 20–39, DOI: 10.15393/j1.art.2017.6224. (In Russian)
- Tolmachev A.I. *Vvedenie v geografiju rastenij* [Introduction to the geography of plants], Leningrad, Nauka Publ., 1974, 224 p. (In Russian)

Received 27.05.2021

Revised 15.10.2021

Accepted 09.03.2022

ГЕОГРАФИЯ МИРОВОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 911.3:631.9

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ЗАНЯТОСТИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ В СТРАНАХ МИРА

А.А. Потапова¹, А.С. Наумов²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра социально-экономической географии зарубежных стран*

² *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Институт аграрных исследований, отдел изучения сельского развития, зав. отделом; e-mail: asnaumov@hse.ru*

¹ *Аспирант, мл. науч. сотр.; e-mail: Alexandra.Potapova@inbox.ru*

² *Зав. кафедрой, доц., канд. геогр. наук; e-mail: alnaumov@mail.ru*

Статья посвящена комплексному изучению трансформации сельскохозяйственной занятости в мире, регионах и отдельных странах. По мере экономического развития происходит снижение роли сельского хозяйства в структуре экономики и занятости. Однако в связи с географической дифференциацией стран этот процесс проходит крайне неравномерно, в разные временные периоды и разными темпами. Развитые на сегодняшний день страны прошли трансформацию в середине XIX – первой половине XX в., развивающиеся страны Латинской Америки и Северной Африки во второй половине XX в., многие азиатские государства претерпевают кардинальные изменения в аграрном секторе и занятости в настоящее время. В силу технического прогресса и развития мирового разделения труда темпы прохождения трансформации сельскохозяйственной занятости ускоряются.

На основе большого массива статистических данных по 162 странам в статье проводится анализ места сельского хозяйства в структуре экономики и занятости, а также анализ преобразований сельскохозяйственной занятости в контексте общеэкономических структурных изменений за период с 1991 по 2019 г. Особое внимание уделено этапам трансформации как пространственно-временному процессу и различным путям ее прохождения отдельными государствами.

Ключевые слова: сельскохозяйственная занятость, трансформация занятости, динамика, производительность труда, регионы мира

ВВЕДЕНИЕ

Роль сельскохозяйственного сектора в экономическом развитии поднимается во многих исследованиях [Tsakok, Gardner, 2007; Li et al., 2019b]. Сельское хозяйство имеет значение для общих экономических преобразований страны, оно является источником продовольствия и залогом обеспечения продовольственной безопасности, производства сельскохозяйственного сырья и генерирования финансовых поступлений за счет аграрного экспорта [Johnston, 1970]. Кроме того, для значительной части населения мира сельское хозяйство является основной сферой приложения труда и заработка.

Согласно теориям линейных стадий, страна проходит через последовательные стадии развития [Ruttan, 1965]. Например, в теории стадий экономического роста У. Ростоу выделяются этапы перехода от традиционной к современной экономике: 1) традиционное общество, 2) предпосылки для взлета, 3) взлет, 4) движение к зрелости и 5) высокое

массовое потребление [Rostow, 1960]. Сельское хозяйство играет важную роль на первых трех этапах экономического роста, так как оно обеспечивает сельскохозяйственным сырьем развивающийся промышленный сектор и генерирует капитальные вложения для новых ведущих секторов.

Модели структурных изменений рассматривают развитие как постепенное преобразование преимущественно натуральной экономики в современную капиталистическую через процесс изменения отраслевой и пространственной структуры производства и занятости [Lewis, 1954; Syrquin, 1988]. Рост производительности труда в сельском хозяйстве имеет центральное значение для развития [Timmer, 1988]. Однако эти теории опираются на принцип эндогенного развития, т. е. развитие сельского хозяйства и занятости в нем обусловлено внутренними факторами.

В современном глобальном мире сельскохозяйственное развитие может быть не связано с ростом национальной промышленности и внутреннего рын-

ка, а зачастую происходит под влиянием экзогенных факторов. Например, благодаря развитию производства и экспорта сои в Бразилии начали развиваться разные отрасли сельского хозяйства и экономики [Bustos et al., 2016; Brazilian agriculture..., 2015]: животноводство – КРС и птицеводство; переработка сельскохозяйственной продукции; производство кормов; машиностроение, обеспечивающее сельскохозяйственную технику; химическая промышленность, специализирующаяся на производстве удобрений, средств защиты растений, и т. д. Развитие сельского хозяйства стран, включенных в МРТ через аграрный экспорт, способствует развитию других отраслей экономики, связанных с агропромышленным комплексом (АПК). Так, по сути, страны становятся более «аграрными», но в структуре экономики и занятости этот эффект проявляется в промышленности, а не в сельском хозяйстве.

Дихотомические позиции относительно роли сельского хозяйства в развитии сходятся в том, что по мере экономического роста экономика страны и занятость становятся менее ориентированными на первичное сельское хозяйство. Таким образом, снижение доли сельского хозяйства в структуре занятости и производства является ключевым аспектом экономического развития [Syrquin, 2008]. Однако, принимая во внимание все искажения, вызванные размерами государств, географической неоднородностью, разной сельскохозяйственной специализацией и т. д., на уровне стран течение данного процесса происходит по разным моделям. Для понимания различий и их систематизации наиболее плодотворным является типологический подход, который можно назвать основой в социально-экономической географии [Типология зарубежных стран..., 2019] и который используется для межстранового и межрегионального сравнения [Григорьев, Павлюшина, 2018; Страны БРИКС..., 2018].

Страны и регионы находятся на разных этапах трансформации сельскохозяйственной занятости и сталкиваются с разными проблемами [Fostering..., 2016]. Наибольшее число исследований посвящено азиатским странам [Vos, 2018], где в настоящее время происходят быстрые изменения структуры экономики и занятости. Например, во многих сельских районах Индии отмечается рост несельскохозяйственных секторов экономики, который не сопровождается увеличением занятости вне сельского хозяйства, производительности труда и сокращением неравенства [Narasimha et al., 2014; Chand et al., 2017]. В Китае в связи с экономическими преобразованиями [Kwan et al., 2018] и развитием крупномасштабного сельского хозяйства происходит сокращение занятости, что обостряет проблему безработицы и бедности сельского на-

селения [Li et al., 2019a]. Отдельные исследования посвящены изучению опыта трансформации в странах Латинской Америки, в сельской местности которых сельское хозяйство все еще играет важную роль, но уже не преобладает. Данные изменения породили высокий уровень неравенства и сельскую бедность [Trivelli, Berdegue, 2019]. В контексте отдельных африканских государств рассматриваются перспективы развития сельскохозяйственного сектора [Broadberry, Gardner, 2013] как источника рабочих мест и сокращения бедности [Romanus et al., 2019], также поднимаются вопросы занятости сельской молодежи, уровня ее образования и т. д. [Collinson et al., 2016].

Исследования сельскохозяйственной занятости в развитых странах, которые находятся на постиндустриальном этапе развития, посвящены проблемам нехватки трудовых ресурсов в сельском хозяйстве в силу недостаточной привлекательности рабочих мест для местного населения и молодежи [Schuh et al., 2019], а также проблемам занятости в сельском хозяйстве иностранцев, что характерно для многих развитых государств [Natale et al., 2019; Наумов, Потапова, 2017]. Исследуются изменения моделей ведения сельскохозяйственной деятельности – диверсификация деятельности фермеров, неполная занятость сельским хозяйством и ее совмещение с другой деятельностью для повышения уровня дохода [Schuh et al., 2019]. Особое место занимает анализ развития сельских районов и сельской экономики, в том числе в контексте вопросов занятости [Torre, Wallet, 2016].

Таким образом, отдельные аспекты трансформации рынка аграрного труда и его последствий по отдельным странам и регионам мира находятся в научном фокусе. Однако попыток обобщения и систематизации процесса трансформации сельскохозяйственной занятости в разрезе стран разного типа не было. Главной целью данной работы является анализ места сельского хозяйства в экономике и занятости и анализ преобразований сельскохозяйственной занятости в мире, регионах и отдельных странах в контексте общеэкономических структурных изменений. Основное внимание уделено этапам трансформации как пространственно-временному процессу и различным путям его прохождения отдельными государствами.

Работа строится на международных сравнениях агрегированных статистических данных Международной организации труда (МОТ), Продовольственной и сельскохозяйственной организации (ФАО) и Всемирного банка. Несмотря на то, что основной период исследования включает 1991–2019 гг., по которым был собран сплошной массив статистических данных, по отдельным странам в статье представле-

ны ретроспективные данные (с середины XIX в.), так как трансформация сельскохозяйственной занятости является сложным и длительным процессом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Страны проходят через трансформацию разнообразно, изменения отличаются характером и скоростью. Пространственно-временной процесс трансформации структуры занятости включает несколько этапов. Для анализа характера трансформации сельскохозяйственной занятости стран и регионов использовался ряд статистических показателей: численность занятых в сельском хозяйстве, численность сельского населения, площадь земельных ресурсов, стоимость сельскохозяйственной продукции и сельскохозяйственного экспорта, а также доля сельского хозяйства в структуре ВВП и доля занятых в сельском хозяйстве в экономически активном населении. Был проведен расчет интегральных показателей, характеризующих агропроизводство и сельскохозяйственную занятость:

- производительность труда – стоимость сельскохозяйственной продукции на одного занятого в сельском хозяйстве;

- трудоинтенсивность сельского хозяйства – численность занятых в сельском хозяйстве на 1000 га обрабатываемых земель. Учитывая географическую специфику отдельных стран, например Монголии, Австралии, где под сельскохозяйственные угодья попадают огромные пустые пространства, определяемые пастбищами, была выбрана категория обрабатываемых земель;

- роль сельскохозяйственной занятости среди сельского населения – численность занятых в сельском хозяйстве на 1000 сельских жителей.

Также были рассмотрены другие характеристики, которые оказывают влияние на сельскохозяйственное производство и занятость. Например, экспортная квота – доля стоимости экспорта сельскохозяйственной продукции в ВВП и стоимость агроэкспорта на единицу сельскохозяйственной продукции.

Ресурсную базу работы составили данные международных статистических организаций, основанные на единых критериях, что позволяет проводить международное сравнение без учета специфики национальной статистики. Для сбора производственных характеристик сельского хозяйства использовались данные ФАО, где публикуются различные показатели агропроизводства с середины XX в. Однако в массиве данных встречаются «разрывы» по новым или поменявшим границы государствам. Статистические данные ФАО по численности и занятости населения представлены ограниченно.

Для анализа показателей занятости населения использовалась база данных МОТ, где публикуются данные по численности населения, его занятости в разрезе секторов экономики, половозрастному составу и территориям (город или село). При составлении этой базы используются прогнозные модели, которые позволяют представить непрерывный временной ряд данных по странам, меняющим свои границы или не имеющим официальных оценок по отдельным годам [ILO..., 2021]. Однако возникают проблемы с анализом данных по сельским территориям: данные по занятости в секторах экономики в разбивке село/город публикуются лишь с 2000 г., по сельской безработице – с 2005 г., по сельскому населению в половозрастном составе данные представлены не на ежегодной основе, а за пятилетний период. Для характеристики экономического развития, в том числе сельского, использовались данные Всемирного банка.

Была составлена база данных, характеризующая сельскохозяйственную занятость и роль сельского хозяйства в экономике стран. В связи с изменениями на политической карте мира она представлена по 162 странам мира за период с 1991 по 2019 г. Однако для исследования процесса трансформации сельскохозяйственной занятости отдельных стран использовались ретроспективные данные (с середины XIX в.). В исследовании применялись статистический, картографический, аналитический и сравнительный методы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлена динамика изменения роли сельского хозяйства в экономике и занятости мира и отдельных регионов с 1991 по 2019 г. [ILOSTAT..., 2021]. Самую значительную трансформацию за этот период прошли развивающиеся страны Восточной Азии и Тихоокеанского региона, а также Южной Азии. Доля сельского хозяйства в ВВП развивающихся стран Восточной Азии и Тихоокеанского региона сократилась на 15,2 процентных пункта (п. п.) (с 23% в 1991 г. до 8% в 2019 г.), а доля занятых в сельском хозяйстве – на 31 п. п. (с 59 до 28%). В Южной Азии отмечалась такая же тенденция, но страны региона изначально имели более высокие показатели. Изменения в структуре экономики этих регионов в основном происходили за счет сферы услуг, которая в 2019 г. составила половину ВВП; доля промышленности увеличивалась до 2010-х гг., в настоящее время отмечается ее сокращение. Однако в структуре занятости увеличивалась доля как промышленности, так и сферы услуг [World Bank..., 2021].

В большинстве стран Латинской Америки структурные преобразования аграрного сектора прошли

в предыдущие десятилетия. С 1991 по 2019 г. страны демонстрируют относительно небольшие изменения: доля сельскохозяйственной занятости снизилась на 8 п. п. и в 2019 г. составила 14%. Такие же тенденции отмечаются в развивающихся странах со средним и низким уровнем дохода, относящихся к Ближнему Востоку и Северной Африке, Европе и Центральной Азии. Во всех этих регионах происходит значительный рост сферы услуг, в то время как роль промышленности, как в экономике, так и в занятости, падает.

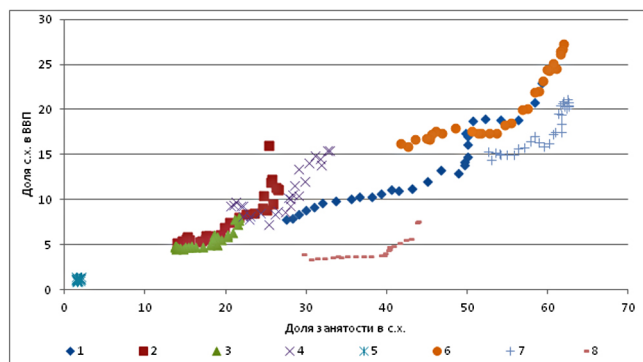


Рис. 1. Динамика доли сельского хозяйства в экономике и занятости по регионам мира, 1991–2019 гг.:

1 – Восточная Азия и Тихоокеанский регион (за исключением стран с высокими доходами); 2 – Европа и Центральная Азия (за исключением стран с высокими доходами);

3 – Латинская Америка и Карибский бассейн; 4 – Ближний Восток и Северная Африка (за исключением стран с высокими доходами); 5 – Северная Америка; 6 – Южная Азия;

7 – Африка к югу от Сахары; 8 – весь мир.

Составлено по [ILOSTAT..., 2021; World Bank..., 2021]

Fig. 1. Dynamics of the share of agriculture in the economy and employment by regions of the world, 1991–2019:

1 – East Asia and the Pacific (excluding high-income countries);

2 – Europe and Central Asia (excluding high-income countries);

3 – Latin America and the Caribbean; 4 – Middle East and North Africa (excluding high-income countries);

5 – North America;

6 – South Asia; 7 – Sub-Saharan Africa; 8 – World.

Compiled by the authors from [ILOSTAT..., 2021;

World Bank..., 2021]

Страны Африки к югу от Сахары по-прежнему имеют относительно высокие показатели сельского хозяйства в структуре занятости и ВВП, а скорость преобразований остается низкой. В последние десятилетия в регионе постепенно увеличивается роль сферы услуг, в 2019 г. она составила около половины ВВП региона и трети занятости [World Bank..., 2021]. Несмотря на это, во многих странах Тропической Африки более половины экономически активного населения напрямую зависит от занятости в сельском хозяйстве.

Во многих развитых государствах с высоким уровнем дохода структурная трансформация аграрного сектора происходила еще в XIX – начале XX в.

Они достигли постиндустриального этапа развития с низкими показателями сельского хозяйства как в структуре экономики, так и в занятости. Динамика практически не менялась с 1991 г., что видно на примере стран Северной Америки (см. рис. 1).

Как правило, трансформация отраслевой структуры экономики и занятости является длительным процессом. В середине XIX в. большинство развитых на сегодняшний день стран в значительной степени зависело от сельского хозяйства. В Финляндии, Японии, Швеции и Испании в 1850 г. уровень сельскохозяйственной занятости превышал 70%, во Франции, США, Бельгии и Нидерландах – находился в пределах 40–60% (что сопоставимо с современными показателями африканских стран). Также сельское хозяйство играло важную роль в экономике данных стран, составляя более трети ВВП. Лишь Великобритания, пройдя промышленную революцию к 1850 г., имела меньшие значения доли сельского хозяйства в экономике и занятости (около 20%).

В последующем столетии благодаря стремительному росту производительности сельскохозяйственного труда и урожайности, применению техники и минеральных удобрений, распространению севооборотов во всех представленных странах произошло существенное сокращение занятости в сельском хозяйстве. Наибольшие изменения показали страны из второй группы. Так, в Бельгии и США уровень сельскохозяйственной занятости сократился более чем на 40%, и в 1950 г. составил около 15%, такие же изменения произошли в Швеции, Франции и Нидерландах.

За период с 1850 по 1950 г. занятость в сельском хозяйстве в Финляндии, Испании и Японии также значительно упала, хотя и осталась на высоком уровне (около 50%). Структурную трансформацию эти страны прошли в последующие 50 лет, сократив занятость в сельском хозяйстве более чем на 40% (рис. 2).

В настоящее время в наиболее развитых и среднеразвитых государствах доля занятых в сельском хозяйстве составляет менее 5%. Если в 1980-х гг. в странах Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) она составляла 7%, то в 1990-х уже 5% и в 2000-х гг. – 4% [Jesus et al., 2014]. Но как было показано, все они прошли структурные сдвиги в разное время, и эти изменения происходили разными темпами.

В последние десятилетия активные изменения происходят в развивающихся странах Азии. Отмечается схожая с современными развитыми государствами модель перемещения рабочей силы из сельского хозяйства, темпы которого выше по сравнению с темпами данного перехода развитых стран в XIX – середине XX в. В таблице 1 представлена динамика сельскохозяйственной занятости в Китае и Респу-

блике Корея с 1962 г. Отметим, что в этих странах уровень занятости в сельском хозяйстве был выше по сравнению с развитыми государствами в середине XIX в. Лишь в 1975 г. они достигли значений XIX в. для развитых государств. Благодаря более высоким темпам снижения сельскохозяйственной занятости (с 69% в 1962 г. до 5% в 2019 г.) за последние 50 лет Республика Корея прошла структурную трансформацию, которая в развитых государствах заняла больше столетия. В настоящее время эта страна находится на постиндустриальном этапе развития. В Китае за этот период также произошли значительные изменения: сокращение доли занятых в сельском хозяйстве с 1962 по 2019 г. составило более 50%. Если в 1960–1980-х гг. темпы сокращения были медленными, то в последние десятилетия они превышали 1 п. п. в год.

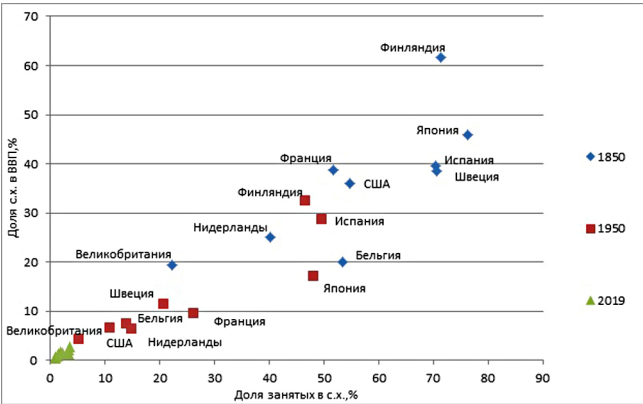


Рис. 2. Динамика доли сельского хозяйства в экономике и занятости стран, относящихся к различным типам развитых стран, 1850, 1950, 2019 гг.

Примечание. В 2019 г. все представленные страны имели низкие значения и отмечены треугольными пунсонами. Составлено по [Ortiz-Ospina, Lippolis, 2017]

Fig. 2. Dynamics of the share of agriculture in the economy and employment in various types of developed countries, 1850, 1950, 2019. In 2019, all countries represented have low scores and are marked with triangular punches. Compiled by the authors from [Ortiz-Ospina, Lippolis, 2017]

Таким образом, в своем историческом развитии страны проходят несколько этапов трансформации сельскохозяйственной занятости (рис. 3). *Первый этап* характеризуется доминирующей ролью сельского хозяйства в занятости населения и экономике страны, темпы ее изменения низкие. Многие страны мира находились на этой стадии в разные временные периоды, например развитые страны Европы – в середине XIX в., когда сельское хозяйство было ведущей отраслью экономики и занятости; страны Латинской Америки и Азии – в середине

Таблица 1
Изменения занятости в сельском хозяйстве с 1962 по 2019 г. в Китае и Республике Корея

Год	Китай	Республика Корея
1962	82	69
1975	77	46
1991	60	14,6
2000	50	10,6
2010	36,7	6,6
2019	25,3	5,1
Ежегодный темп сокращения, п. п.	1	1,1

Примечание. Составлено по [Jesus et al., 2014].

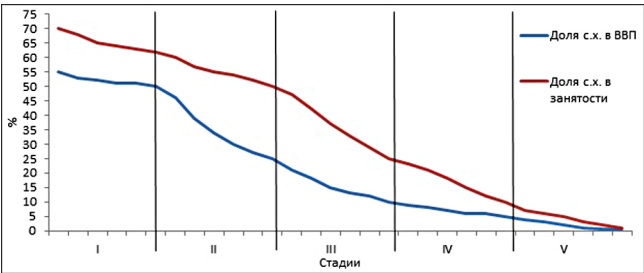


Рис. 3. Этапы трансформации сельскохозяйственной занятости. Составлено авторами

Fig. 3. Stages of transformation of agricultural employment. Compiled by the authors

XX в. В настоящее время на первом этапе находятся отдельные страны Африки южнее Сахары.

На *втором этапе*, как правило, происходит постепенное сокращение доли сельского хозяйства в ВВП страны, в то время как сельскохозяйственная занятость остается еще высокой. На этом этапе происходит постепенная диверсификация экономики и развитие промышленности и/или сферы услуг. Однако рост несельскохозяйственных секторов экономики не сопровождается ускоренным сокращением сельскохозяйственной занятости. Производительность труда в сельском хозяйстве находится на низком уровне. Темпы сокращения доли сельского хозяйства в ВВП выше по сравнению с темпами изменения его доли в занятости. В конце XX в. на этом этапе находились многие страны Африки и Азии, в которых начала развиваться промышленность и меняться структура экономики, но структура занятости оставалась преимущественно аграрной. В настоящее время данные процессы происходят только в беднейших африканских государствах, например Танзании, Чаде, Нигере, Эфиопии и т.д. Экономика этих стран помимо сельского хозяйства полагается на добывающую промышленность (нефть, уран, руды металлов) и обраба-

тывающую промышленность, которая, в основном, представлена переработкой сельскохозяйственного сырья. В занятости экономически активного населения значительно преобладает сельское хозяйство.

На следующем, *переходном этапе* вслед за снижением роли сельского хозяйства в экономике происходит сокращение и в занятости. Постепенно увеличивается производительность труда в силу применения техники, удобрений, более устойчивых культур и т. д., что высвобождает часть работников из сельского хозяйства. Кроме того, ускорению сокращения сельскохозяйственной занятости способствует разрыв уровня доходов и условий работы между разными секторами экономики [Christiaensen et al., 2020]. На переходном этапе отмечаются самые высокие темпы изменения доли сельского хозяйства в занятости. Несмотря на то, что сельское хозяйство уже не доминирует в структуре экономики, его доля продолжает сокращаться в структуре ВВП.

Как было показано на примере развитых на сегодняшний день стран, переходную стадию государства проходят в разные временные периоды и разными темпами. Так, например, Бельгия, Франция, Швеция трансформацию сельскохозяйственной занятости прошли в первой половине XX в., Испания, Япония, Южная Корея – во второй половине. В конце XX в. сокращение сельскохозяйственной занятости происходило во многих странах Латинской Америки, а также в отдельных государствах Северной Африки, Азии и Европы. В настоящее время на переходном этапе находятся многие государства Южной и Юго-Восточной Азии. Примером может служить Индия, экономика которой в конце XX в. претерпела изменения и перестала быть аграрной, а в настоящее время отмечается сокращение сельскохозяйственной занятости.

Далее следует *постпереходная стадия*, когда еще продолжается сокращение сельскохозяйственной занятости, но не такими быстрыми темпами, как на предыдущем этапе. Увеличиваются масштабы внутренней миграции из сельской местности в города, что приводит к росту урбанизации. В основном, происходят изменения в занятости сельского населения и диверсификация сельской экономики в целом. В начале 1990-х гг. на этой стадии находились многие страны Южной и Восточной Европы, а также Латинской Америки. В XXI в. на четвертую стадию трансформации сельскохозяйственной занятости перешли азиатские государства и отдельные страны Латинской Америки и Северной Африки.

На последнем этапе государства приходят к *постиндустриальной стадии* развития, где роль сельского хозяйства в экономике и занятости низкая. Однако за счет высокой производительности труда объем выпуска сельскохозяйственной продукции этих стран возрастает. Как правило, у развитых

государств сложилась стабильная сельскохозяйственная специализация, они занимают определенную нишу на мировом аграрном рынке, в то время как у развивающихся стран специализация подвижна [Наумов, 2012], что влияет на сельскохозяйственное производство и занятость в нем. К концу XX в. многие развитые государства были на данной стадии, в настоящее время к постиндустриальному развитию перешли отдельные страны Восточной Европы, Латинской Америки и Азии, чему способствовали как качественные изменения экономического развития, так и изменения в аграрном секторе (смена специализации, механизация производства и т. д.).

Для того чтобы проследить, на каком этапе сельскохозяйственной трансформации находятся страны мира и какие изменения происходят, предложена типология стран исходя из доли сельского хозяйства в ВВП и занятости (табл. 2).

Несмотря на условность границ выделенных типов, динамика изменений за 1991 и 2019 гг. показывает, что большинство стран мира активно движется по стадиям трансформации сельскохозяйственной занятости. За этот период более чем в два раза уменьшилось количество аграрных государств, где доля сельского хозяйства в занятости составляет более 50%, а в ВВП – более 25%. В 1991 г. в эту группу попадали многие страны Африки к югу от Сахары и Азии. В 2019 г. в этой группе остались лишь отдельные африканские государства (рис. 4). Среди них можно выделить отсталые страны (Сьерра-Леоне, Гвинея-Биссау и Сомали), где доля сельского хозяйства остается высокой не только в структуре занятости, но и в экономике страны (более 50%).

Количество стран с сокращающейся ролью сельского хозяйства в экономике с 1991 по 2019 г. осталось прежним, но их состав значительно изменился. Если в конце XX в. к данному типу относились страны Азии (Китай, Индонезия, Таиланд) и Африки (Камерун, Замбия, Зимбабве, Гвинея), то в 2019 г. они перешли на другой этап трансформации, а в состав этого типа вошли такие страны, как Лаос, Папуа – Новая Гвинея и Бутан, а также ДР Конго, Мозамбик, Мадагаскар, Уганда и др.

На втором этапе трансформации сельскохозяйственной занятости, как правило, происходят изменения структуры экономики, вслед за которыми следуют изменения структуры занятости. Однако выделяется ряд стран, где сокращение роли сельского хозяйства происходит одновременно как в структуре экономики, так и в структуре занятости. В 1991 г. к данному типу относились республики Центральной Азии и Закавказья, Восточной и Южной Европы, в 2019 г. – лишь африканские государства: Бенин, Либерия, Малави и Судан (рис. 5).

Таблица 2

Типы и подтипы стран по роли сельского хозяйства в экономике и занятости

Стадии трансформации	Тип	Подтипы	Пороговые значения		Кол-во стран в году	
			Доля с. х. в ВВП, %	Доля с. х. в занятости, %	1991	2019
I	Страны с высокой ролью с. х. в структуре экономики и занятости	Отсталые страны	Более 50	Более 50	6	3
		Аграрные страны	25–50	Более 50	27	9
II	Страны, проходящие трансформацию сельскохозяйственной занятости	Страны с сокращающейся ролью с. х. в экономике и занятости	25–50	25–50	15	4
		Страны с сокращающейся ролью с. х. в экономике	Менее 25	Более 50	10	11
III		Страны с сокращающейся ролью с. х. в занятости	Менее 25	25–50	28	38
IV	Страны с низкой ролью с. х. в структуре экономики и занятости	—	Менее 25	10–25	39	38
V	Развитые страны с диверсифицированной структурой экономики и занятости	—	Менее 10	Менее 10	36	58

Примечание. Составлено по [ILO..., 2021; World Bank..., 2021].

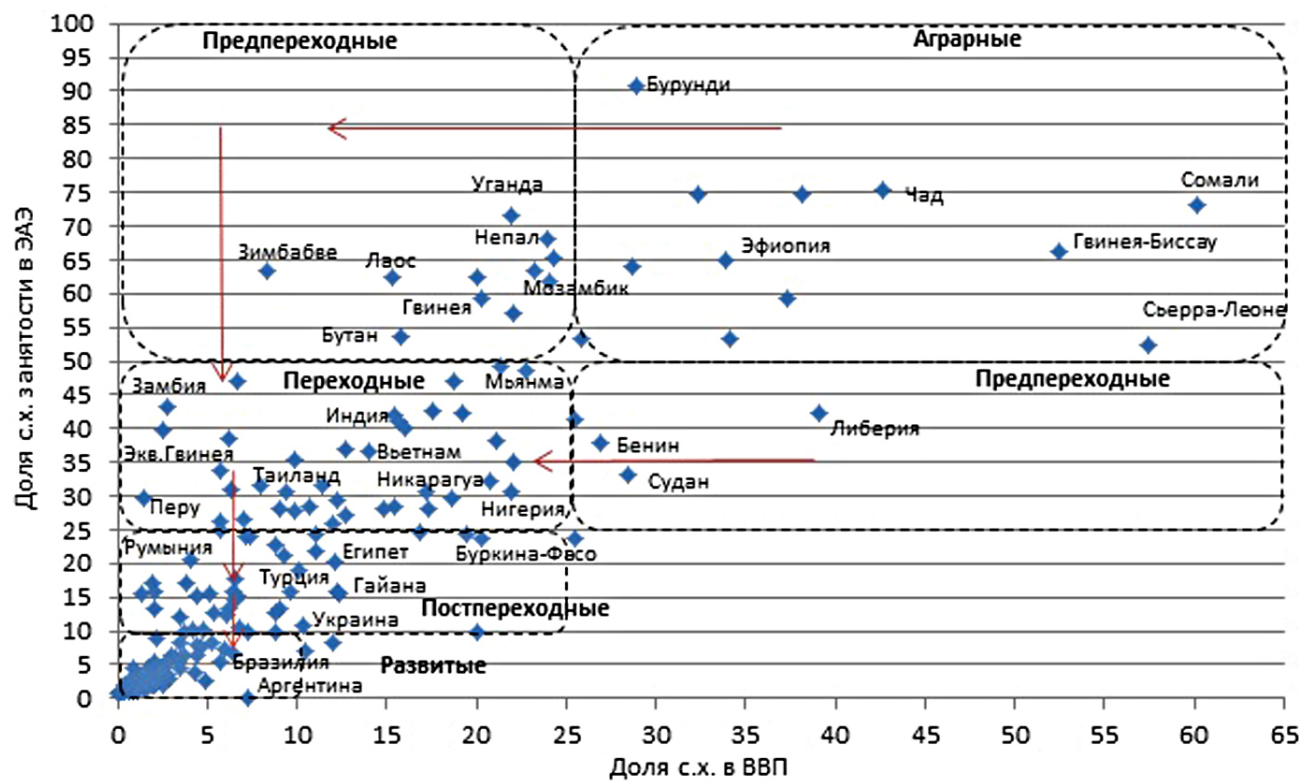


Рис. 4. Распределение стран по роли сельского хозяйства в экономике и занятости, 2019 г. Составлено авторами
Fig. 4. Distribution of countries by the role of agriculture in economy and employment, 2019. Compiled by the authors

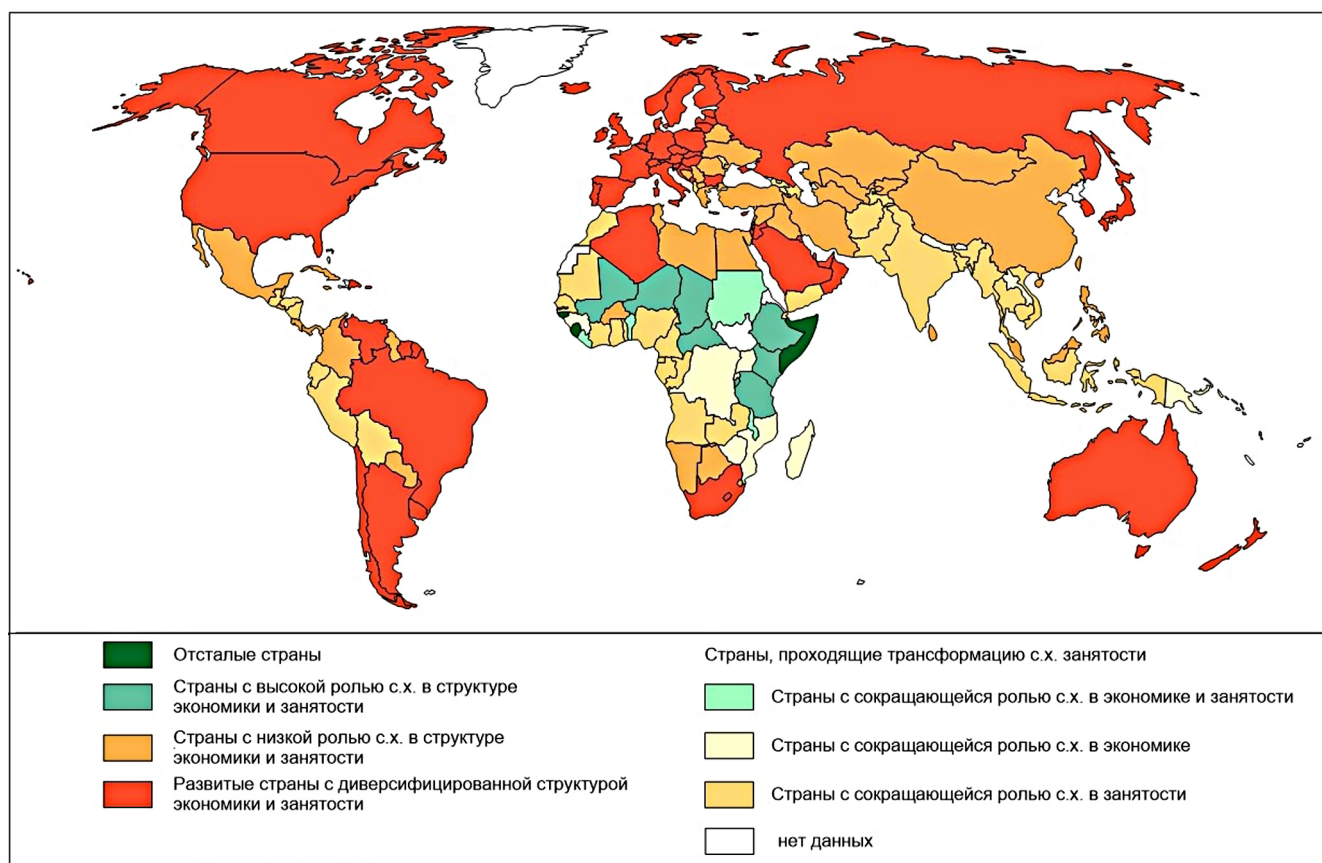


Рис. 5. Типы и подтипы стран по роли сельского хозяйства в экономике и занятости, 2019 г. Составлено авторами

Fig. 5. Types and subtypes of countries by the role of agriculture in economy and employment, 2019. Compiled by the authors

За исследуемый период увеличилась группа стран, находящихся на третьем этапе трансформации сельскохозяйственной занятости, где доля сельского хозяйства в ВВП составляет менее 25%, и происходит постепенное сокращение его доли в занятости (до 25%). В 1991 г. к переходным в основном относились страны Латинской Америки, Африки, а также отдельные страны Азии. В 2019 г. половина этих стран перешла на следующий этап трансформации. В свою очередь в страны с сокращающейся долей сельскохозяйственной занятости перешло большинство стран Южной и Юго-Восточной Азии, Западной Африки, которые в 1991 г. относились к аграрным, а также Молдова, Грузия, Азербайджан, Армения. Как и в конце XX в., в этот тип попадают плантационные страны Центральной Америки. В них произошли незначительные изменения сельскохозяйственной занятости, что можно связать с их специализацией на производстве экспортных культур (сахарный тростник, бананы, кофе) и достаточно высокой экспортной квоте.

Количество стран с низкой ролью сельского хозяйства в структуре экономики и занятости с 1991 по 2019 г. осталось прежним, но состав группы значительно изменился. В конце XX в. к ним преимущественно относились страны Восточной и Южной Европы, Латинской Америки и отдельные страны Северной Африки и Азии. В 2019 г. на четвертый этап трансформации перешли многие государства Азии. Китай совершил большой скачок, сократил вдвое долю занятости в сельском хозяйстве. В результате страна с 1991 г. прошла несколько этапов трансформации сельскохозяйственной занятости. Также в эту группу в 2019 г. попала Буркина-Фасо, в которой за это время занятость в сельском хозяйстве сократилась более чем в три раза (с 88 до 24%). Это можно связать с изменением типа данной страны: в ней начала бурно развиваться горнодобывающая промышленность, в основном золотодобыча. За счет притока инвестиций в стране увеличилась производительность труда в сельском хозяйстве практически в пять раз [«Золотая жила» Буркина-Фасо..., 2016]. Также в 2019 г. к этому типу стран отнесены рудные и нефтяные страны, вовлеченные в МРТ, – Гайана, Ирак, Намибия. С 1991 г. значительные политические и экономические изменения произошли в постсоветских странах Центральной Азии, которые повлияли на то, что доля занятых в сельском хозяйстве Казахстана, Киргизии, Узбекистана и Туркменистана сократилась до уровня 15–25%.

В 2019 г. на четвертый этап трансформации перешли многие государства Азии. Китай совершил большой скачок, сократил вдвое долю занятости в сельском хозяйстве. В результате страна с 1991 г. прошла несколько этапов трансформации сельскохозяйственной занятости. Также в эту группу в 2019 г. попала Буркина-Фасо, в которой за это время занятость в сельском хозяйстве сократилась более чем в три раза (с 88 до 24%). Это можно связать с изменением типа данной страны: в ней начала бурно развиваться горнодобывающая промышленность, в основном золотодобыча. За счет притока инвестиций в стране увеличилась производительность труда в сельском хозяйстве практически в пять раз [«Золотая жила» Буркина-Фасо..., 2016]. Также в 2019 г. к этому типу стран отнесены рудные и нефтяные страны, вовлеченные в МРТ, – Гайана, Ирак, Намибия. С 1991 г. значительные политические и экономические изменения произошли в постсоветских странах Центральной Азии, которые повлияли на то, что доля занятых в сельском хозяйстве Казахстана, Киргизии, Узбекистана и Туркменистана сократилась до уровня 15–25%.

Средние характеристики стран, поменявших тип с 1991 по 2019 г.

Тип		Аграрные страны	Страны, проходящие трансформацию сельскохозяйственной занятости			Страны с низкой ролью с. х.	Развитые страны
Подтип			Сокращение роли с. х. в экономике и занятости	Сокращение роли с. х. в экономике	Сокращение роли с. х. в занятости		
Кол-во стран		3	2	9	23	21	23
Доля занятых в с.х.	1991	61	53	76	56	37	15
	2019	57	42	63	37	19	6
	2019/1991	−0,1	−0,4	−0,5	−0,6	−0,6	−0,3
Доля с.х. в ВВП	1991	33	58	39	30	22	8
	2019	31	32	21	14	9	4
	2019/1991	−0,1	−0,9	−0,6	−0,5	−0,4	−0,1
Доля сел. нас.	1991	84	65	83	67	55	38
	2019	75	66	70	55	46	31
	2019/1991	−0,3	0,0	−0,4	−0,4	−0,3	−0,2
Занятые в с. х. на 1000 сел. жит.	1991	290	394	405	337	264	232
	2019	343	304	417	296	185	177
Занятые в с. х. на 1000 га	1991	1 390	1 113	2 515	1 187	823	358
	2019	2 527	1 364	2 742	1 327	595	342
Продукция на одного работника, долл. США	1991	1 541	1 247	1 002	1 013	3 018	11 228
	2019	1 313	2 904	1 192	2 529	6 646	28 024

Примечание. Составлено по [FAOSTAT..., 2021; ILO..., 2021; World Bank..., 2021].

К развитым странам с диверсифицированной структурой экономики и занятости в 1991 г. в основном относились страны Европы, Северной Америки и Азии с высоким уровнем дохода. Они прошли структурную трансформацию в первой половине XX в. и в настоящее время находятся на постиндустриальном этапе развития. Также к ним относилась Аргентина, где в силу сельскохозяйственной специализации и высокой механизации отмечается низкая занятость в сельском хозяйстве, Иордания и Суринам, основой экономики которых является горнодобывающая промышленность. Кроме того, в этой группе стран выделяются псевдоразвитые государства Персидского залива, где сельскохозяйственная занятость низкая. Это объясняется как географическими характеристиками, так и высоким уровнем доходов государств от нефтедобычи, что делает импорт сельскохозяйственной продукции более эффективным, нежели развитие собственного сельского хозяйства. В 2019 г. количество развитых государств увеличилось практически в два раза,

в основном за счет стран Восточной Европы, а также Латинской Америки. Однако в группу развитых государств также попали такие вовлеченные в МРТ страны, как Алжир, Лесото и Маврикий, где занятость в сельском хозяйстве низкая за счет развития добывающих отраслей или сферы услуг. Например, Маврикий с момента получения независимости проводит политику диверсификации экономики, что сказывается на занятости и смене типа. В настоящее время он превратился из страны с плантационной экономикой в страну с растущей ролью промышленности, финансового и туристического секторов. Стратегия развития правительства сосредоточена на расширении местных финансовых институтов и создании отечественной информационно-телекоммуникационной отрасли [Wells, 2021].

Таким образом, с 1991 по 2019 г. 82 страны из 162 совершили переход на другую стадию сельскохозяйственной трансформации (рис. 6). Наибольшие изменения произошли в группе стран, находящихся на третьем и четвертом этапах трансформации,

в которых отмечаются самые высокие ежегодные темпы сокращения доли сельскохозяйственных занятых ($-0,6$ п. п.), а также доли сельского хозяйства в ВВП ($-0,4 \dots -0,5$ п. п.). Кроме того, в этих странах происходит сокращение числа сельскохозяйственных работников среди сельского населения, т.е. диверсифицируются сельская экономика и занятость. Двукратный рост производительности труда сопровождается сокращением численности занятых на 1000 га обрабатываемых земель. Трансформация сельскохозяйственной занятости сопровождается ростом урбанизации. Однако в странах, находящихся на переходном этапе, преобладает сельское население (более 50%), в то время как страны постпереходной стадии перестают быть сельскими.

В странах, перешедших ко второму этапу трансформации (табл. 3), наоборот, быстрее падает доля сельского хозяйства в экономике по сравнению

с его долей в занятости. Роста производительности сельскохозяйственного труда и сокращения численности занятых на единицу обрабатываемых земель не отмечается.

В период с 1991 по 2019 г. в категорию развитых государств, полностью прошедших сельскохозяйственную трансформацию, вошли 23 государства. Средняя доля сельского хозяйства в их занятости снизилась до 6% ($-0,3$ п. п. в год), а в ВВП – до 4% ($-0,1$ п. п.). Стоимость сельскохозяйственной продукции на одного занятого выросла в 2,5 раза, в то время как численность занятых на 1000 сельских жителей и 1000 га обрабатываемых земель сократилась в 1,4 раза.

Еще 80 государств в 2019 г. остались в тех же группах, где были в 1991 г. Изменения доли сельского хозяйства, как в структуре экономики, так и в занятости, проходят низкими темпами (табл. 4).

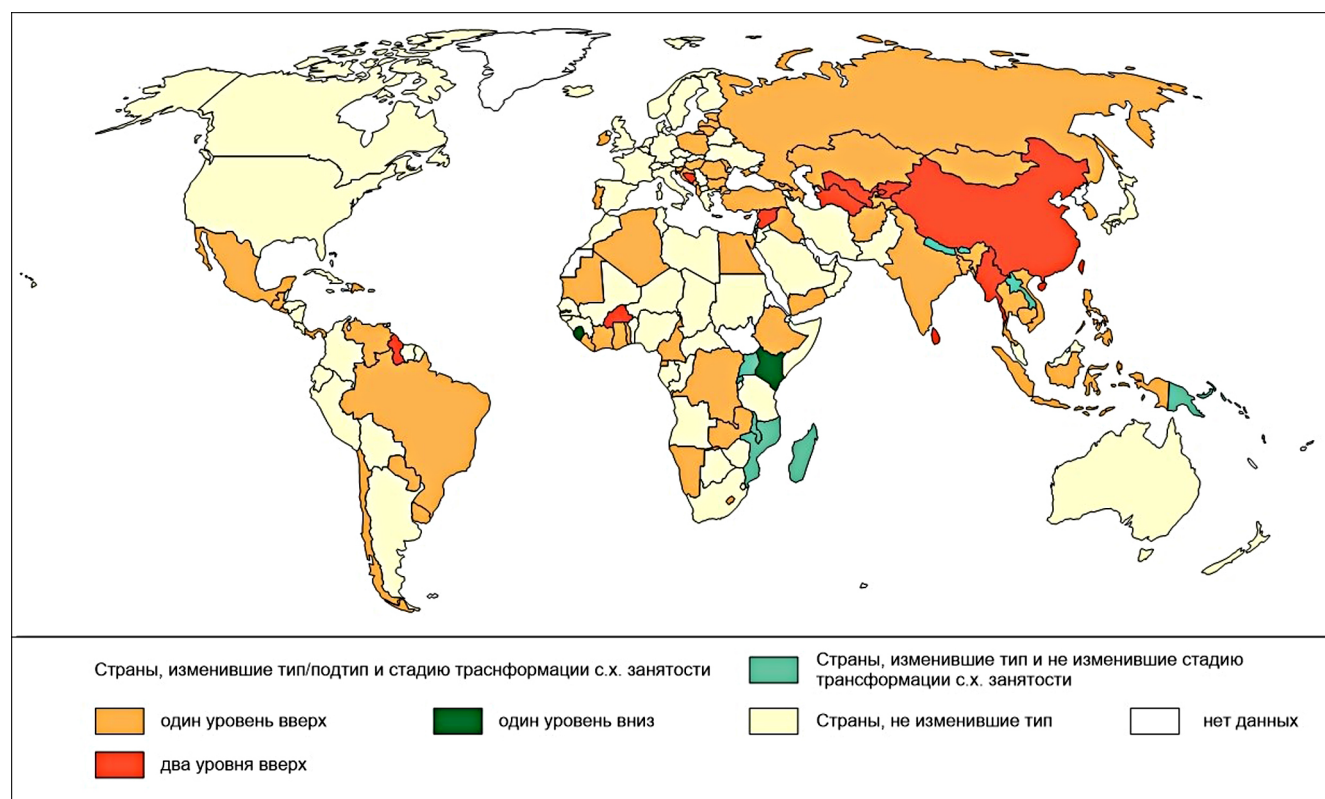


Рис. 6. Изменения типов стран по роли сельского хозяйства в экономике и занятости, 2019 к 1991 г. Составлено авторами

Fig. 6. Changing types of countries by the role of agriculture in economy and employment, 2019 to 1991. Compiled by the authors

Так, экономическое развитие представляет собой процесс отраслевых изменений: первоначально доминирует сельскохозяйственный сектор, на индустриальном этапе главную роль играет производственный сектор, а на постиндустриальном – сектор услуг. Однако отмечается тенденция, что не все страны проходят этап роста промышленности, сфера услуг зачастую занимает главное место в эконо-

мическом развитии [Pandit, Casetti, 1989]. Это подтверждается проведенным анализом; во всех типах стран сокращение сельскохозяйственного сектора в экономике и занятости в основном компенсируется ростом третичного сектора услуг. Доля промышленности находится примерно на одном уровне, за исключением постпереходных и развитых стран, где она сокращается.

Средние характеристики стран, оставшихся в том же типе с 1991 по 2019 г.

Тип		Страны с высокой ролью с. х.		Страны, проходящие трансформацию сельскохозяйственной занятости			Страны с низкой ролью с. х.	Развитые страны
Подтип		Отсталые	Аграрные	Сокращение роли с.х. в экономике и занятости	Сокращение роли с. х. в экономике	Сокращение роли с. х. в занятости		
Кол-во стран		2	6	2	2	15	17	36
Доля занятых в с. х.	1991	73	80	47	64	39	20	5
	2019	70	73	36	61	30	13	2
	2019/1991	-0,1	-0,2	-0,4	-0,1	-0,3	-0,2	-0,1
Доля с. х. в ВВП	1991	58	40	38	16	15	13	3
	2019	56	35	28	14	12	7	2
	2019/1991	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1	-0,1	-0,2	-0,0
Доля сел. нас.	1991	69	79	68	71	49	41	23
	2019	55	71	59	66	36	31	17
	2019/1991	-0,5	-0,3	-0,3	-0,2	-0,4	-0,3	-0,2
Занятые в с. х. на 1000 сел. жит.	1991	356	378	238	356	303	207	144
	2019	418	416	222	386	394	227	117
Занятые в с. х. на 1000 га	1991	1 302	1 531	409	754	6 068	545	538
	2019	2 140	1 251	421	956	4 960	664	657
Продукция на одного работника, долл. США	1991	3 027	745	1 299	812	1 891	7 058	52 240
	2019	2 696	1 052	2 239	663	2 987	11 885	147 880

Примечание. Составлено по [FAOSTAT..., 2021; ILO..., 2021; World Bank..., 2021].

ВЫВОДЫ

В рамках экономического развития страны проходят несколько стадий трансформации, при которой отмечается сокращение роли сельского хозяйства в структуре ВВП и занятости. На первом этапе значения данного сектора велики как в экономике, так и в занятости, а темпы изменения низкие. Аграрные страны в значительной степени зависят от сельского хозяйства. На втором этапе быстрыми темпами происходит сокращение доли сельского хозяйства в ВВП, тогда как сельскохозяйственная занятость остается на высоком уровне, темпы изменения небольшие. На третьем, переходном, этапе продолжается сокращение значения сельского хозяйства в экономике, но более медленными темпами по сравнению с предыдущей стадией, а также начинается активное снижение сельскохозяйственной занятости. На этом этапе отмечаются высокие темпы изменения сельскохозяйственной занятости, далее динамика замедляется. Постепенно государства приходят к постиндустриальной стадии развития, где роль сельского хозяйства в экономике и занятости незначительная. На всех этапах сокращение сельского хозяйства, в большей степени,

отражается в росте сферы услуг; промышленность либо стагнирует, либо сокращается.

Переходные и постпереходные этапы сельскохозяйственной трансформации сопровождаются значительным ростом производительности труда и снижением численности занятых на 1000 га обрабатываемой земли, а также диверсификацией сельской экономики и структуры занятости, т.е. меньшей зависимостью от сельскохозяйственного сектора и повышением уровня жизни и доходов.

Процесс сельскохозяйственного перехода проходит с разной динамикой и в разный временной период. Современные развитые страны, находящиеся в настоящее время на постиндустриальном этапе развития, прошли сельскохозяйственную трансформацию в середине XIX – начале XX в. Если в 1850 г. в Японии, США, Франции, Нидерландах доля занятых в сельском хозяйстве была более 50%, то в последующие сто лет, к 1950 г., она снизилась в несколько раз, а в настоящее время достигла нескольких процентов. В большинстве стран Латинской Америки и отдельных государствах Азии, например Южной Кореи, сельскохозяйственная трансформация на-

чалась с середины XX в. и продолжалась до конца XX в., т. е. заняла значительно меньше времени по сравнению с переходом в нынешних развитых государствах. С 1990-х гг. и в настоящее время на переходном этапе находятся многие государства Азии, особенно быстрые изменения происходят в Восточной Азии благодаря Китаю, в котором доля занятости в сельском хозяйстве с 1991 по 2019 г. сократилась вдвое. Благодаря развитию новых технологий в аграрном секторе происходит постепенное сокращение времени прохождения трансформации сельскохозяйственной занятости. Во многих странах Африки южнее Сахары изменения в структуре занятости еще не начались, они находятся в значительной зависимости от сельского хозяйства. Однако в некоторых государствах, богатых полезными ископаемыми, развивается добывающая промышленность, перетягивая рабочую силу из сельского хозяйства, хотя этот процесс не всегда сопровождается ростом уровня доходов и жизни населения.

Таким образом, из-за географического разнообразия страны мира находятся на разных этапах сельскохозяйственной трансформации: какие-то уже ее завершили, какие-то находятся в активной стадии перехода, а какие-то еще не начали. С конца XX в. самые быстрые структурные изменения претерпевали азиатские страны, более умеренно эти процессы проходили в странах Латинской Америки, где структурный сдвиг произошел раньше, и в странах Африки к югу от Сахары, где структурная трансформация еще не началась. На происходящие изменения оказывают влияние различные факторы, что было показано на отдельных примерах: общие качественные изменения уровня экономического развития, а также изменения модели развития (для постсоветских стран – переход к рыночной экономике); изменения аграрного сектора (технологические изменения, смена специализации сельского хозяйства и т. д.); переход на другие виды деятельности в связи с развитием, например, горно-рудных или нефтяных месторождений и т. д.

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-35-90038-Аспиранты «Занятость сельскохозяйственного населения в странах с различными моделями аграрного развития: структурные, временные и пространственные аспекты».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Григорьев Л.М., Павлюшина В.А. Межстрановое неравенство: динамика и проблема стадий развития // *Вопросы экономики*. 2018. № 7. С. 5–29. DOI: 10.32609/0042-8736-2018-7-5-29.
- Наумов А.С. Современное развитие районов специализированного земледелия в зарубежных странах // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2012. № 2. С. 40–48.
- Наумов А.С., Потапова А.А. Влияние международной трудовой миграции на современное региональное развитие мирового сельского хозяйства // *Региональные исследования*. 2017. № 4. С. 56–70.
- Страны БРИКС: классификация регионов // *Бюллетень о текущих тенденциях мировой экономики*. 2018. Вып. 34. 20 с.
- Типология зарубежных стран: учебно-методическое пособие / А.С. Наумов, Р.А. Дохов, Д.С. Елманова, Ф.А. Попов; под ред. А.С. Наумова. М.: Пеликан, 2019. 336 с.
- Brazilian agriculture: prospects and challenges, *OECD-FAO Agricultural Outlook*, 2015, p. 61–109, DOI: 10.1787/agr_outlook-2015-en.
- Broadberry S., Gardner L. Africa's growth prospects in a European mirror: a historical perspective, *CAGE Online Working Paper Series, Competitive Advantage in the Global Economy (CAGE)*, 2013, no. 172, 26 p.
- Bustos P., Bruno C., Jacopo P. Agricultural productivity and structural transformation: evidence from Brazil, *American Economic Review*, 2016, no. 106(6), p. 1320–65, DOI: 10.1257/aer.20131061.
- Chand R., Srivastava S., Singh J. Changing structure of rural economy of India implications for employment and growth, *NITI Aayog*, 2017, 30 p.
- Christiaensen L., Rutledge Z., Taylor J.E. The future of work in agriculture: some reflections, *Policy Research Working Paper*, no. 9193, World Bank, Washington DC, 2020, 27 p.
- Collinson M.A., White M.J., Ginsburg C.G. Youth migration, livelihood prospects and demographic dividend: A comparison of the census 2011 and Agincourt health and demographic surveillance system in the rural northeast of South Africa, *African Population Studies*, 2016, no. 30(2), p. 2629–39.
- Fostering inclusive rural transformation, *Rural Development Report*, 2016, 378 p.
- Jesus F., Connie D., Matteo L. The declining share of agricultural employment in the people's republic of China: how fast? *ADB economics working paper series*, 2014, no. 419, 24 p.
- Johnston B.F. Association agriculture and structural transformation in developing Countries: a survey of research, *Journal of Economic Literature*, 1970, no. 8(2), p. 369–404.
- Kwan F., Wu Y., Zhuo S. Surplus agricultural labour and China's Lewis turning point, *China Economic Review*, 2018, no. 48, p. 244–257.
- Li M., Hualou L., Yingnan Z., Shuangshuang T., Dazhuan G., Xiaosong T. Agricultural labor changes and agricultural economic development in China and their implications for rural vitalization, *Journal of Geographical Sciences*, 2019a, no. 29(2), p. 163–179.

- Li Y., Westlund H., Liu Y. Why some rural areas decline while some others not: An overview of rural evolution in the world, *Journal of Rural Studies*, 2019b, no. 68, p. 135–143.
- Lewis W.A. *Economic development with unlimited supplies of labour*, The Manchester School, 1954, no. 22, p. 139–191.
- Narasimha R.D., Amarendra R.A., Nagaraj N., Cynthia B. Emerging trends in rural employment structure and rural labor markets in India, *Working Paper Series*, 2014, no. 56, 26 p.
- Natale F., Kalantaryan S., Scipioni M., Alessandrini A., Pasa A. *Migration in EU rural areas*, Office of the European Union, Luxembourg, 2019, 65 p.
- Pandit K., Casetti E. The shifting patterns of sectoral labor slllocation during development: developed versus developing countries, *Annals of the Association of American Geographers*, 1989, no. 79(3), p. 329–344, DOI: 10.1111/j.1467-8306.1989.tb00266.x.
- Romanus O., Oluwatoyin M., Obindah G., Toun O., Ebere N. Agriculture development, employment generation and poverty reduction in West Africa, *The Open Agriculture Journal*, 2019, no. 13, p. 82–89.
- Rostow W.W. *The stages of economic growth: a non-communist manifesto*, London, 1960, 196 p.
- Ruttan V.W. Growth stage theories and agricultural development policy, *Australian Journal of Agricultural Economics*, 1965, no. 9, p. 17–32. DOI: 10.1111/j.1467-8489.1965.tb00327.x.
- Schuh B., Maucorps A., Munch A., Brkanovic S. *Research for AGRI Committee – The EU farming employment: current challenges and future prospects*, European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels, 2019, 122 p.
- Syrquin M. Patterns of structural change, *Handbook of development economics*, H. Chenery, T.N. Srinivasan (eds.), London, Elsevier BV, 1988, no. 1, p. 203–273.
- Syrquin M. Structural Change and Development, *International Handbook of Development Economics*, A.K. Dutt, J. Ros (eds.), London, Elsevier, 2008, no. 1, p. 48–67.
- Timmer C.P. The Agricultural Transformation, *Handbook of development economics*, H. Chenery, T.N. Srinivasan (eds.), Amsterdam, Elsevier, 1988, p. 275–331.
- Torre A., Wallet F. *Regional development in rural areas*, Analytical tools and public policies, Springer Briefs in Regional Science, 2016, 110 p., DOI: 10.1007/978-3-319-02372-4.
- Trivelli C., Berdegué J.A. Rural transformation. Looking towards the future of Latin America and the Caribbean, 2030 – Food, agriculture and rural development in Latin America and the Caribbean, 2019, no. 1, 76 p.
- Tsakok I., Gardner B. Agriculture in economic development: primary engine of growth or chicken and egg? *American Journal of Agricultural Economics*, 2007, no. 89(5), p. 1145–1151.
- Vos R. Agricultural and rural transformations in Asian development, *WIDER Working Paper*, 2018, no. 87, 33 p.
- Электронные ресурсы
- «Золотая жила» Буркина-Фасо // Euronews, 05.12.2016. URL: <https://ru.euronews.com/2016/12/05/burkina-faso-wants-to-share-its-gold-wealth> (дата обращения 17.09.2021).
- FAOSTAT: Food and agriculture data, URL: <http://www.fao.org/faostat/en/#data> (дата обращения 10.06.2021).
- ILO: Modeled estimates and projections, URL: <https://ilostat.ilo.org/resources/concepts-and-definitions/ilo-modeled-estimates/> (дата обращения 19.05.2021).
- ILOSTAT: Statistics on the working-age population and labour force, URL: <https://ilostat.ilo.org/topics/population-and-labour-force/> (дата обращения 16.03.2021).
- Ortiz-Ospina E., Lippolis N. Structural transformation: how did today's rich countries become “deindustrialized”? // Our world in data, 2017, URL: <https://ourworldindata.org/structural-transformation-and-deindustrialization-evidence-from-todays-rich-countries> (дата обращения 16.07.2021).
- Wells L. Mauritius // Britannica, 2021, URL: <https://www.britannica.com/place/Mauritius#ref4720> (дата обращения 16.09.2021).
- World Bank: Open Data / Indicators, URL: <https://data.worldbank.org/> (дата обращения 16.03.2021).

Поступила в редакцию 21.10.2021
После доработки 14.02.2022
Принята к публикации 09.03.2022

SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS OF AGRICULTURAL EMPLOYMENT IN THE COUNTRIES OF THE WORLD

A.A. Potapova¹, A.S. Naumov²

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Socio-Economic Geography of Foreign Countries

² National Research University “Higher School of Economics”, Institute of Agrarian Research, Department of Rural Development Studies, Department Head; e-mail: asnaumov@hse.ru

¹ Ph.D. student, Junior Scientific Researcher; e-mail: Alexandra.Potapova@inbox.ru

² Head of the Department, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: alnaumov@mail.ru

The article is devoted to a comprehensive study of the transformation of agricultural employment in the world, regions and countries. Along with the progress of economic development, the role of agriculture in the structure of economy and employment decreases. However, due to the geographical differentiation of countries, the process is extremely uneven; it occurs at different time periods and at different rates. The developed

countries underwent transformation in the middle of the 19th – first half of the 20th century, the developing countries of Latin America and North Africa – in the second half of the 20th century. Many Asian countries are undergoing dramatic changes in the agricultural sector and employment nowadays. The pace of the agricultural employment transformation is accelerating due to technological progress and the development of the world division of labor.

The study is based on a large array of statistical data for 162 countries. The article analyzes the place of agriculture in the structure of economy and employment, as well as the transformation of agricultural employment under general economic structural changes for the period from 1991 to 2019. Particular attention is paid to the stages of transformation as a spatio-temporal process and the ways it took cause in different states.

Keywords: agricultural employment, transformation of employment, dynamics, labor productivity, regions of the world

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project number 20-35-90038-aspiranty Agricultural employment in the countries with different models of agrarian development: structural, temporal and spatial aspects).

REFERENCES

- Brazilian agriculture: prospects and challenges*, OECD-FAO Agricultural Outlook, 2015, p. 61–109, DOI: 10.1787/agr_outlook-2015-en.
- Broadberry S., Gardner L. *Africa's growth prospects in a European mirror: a historical perspective*, CAGE Online Working Paper Series, Competitive Advantage in the Global Economy (CAGE), 2013, no. 172, 26 p.
- Bustos P., Bruno C., Jacopo P. Agricultural productivity and structural transformation: evidence from Brazil, *American Economic Review*, 2016, no. 106(6), p. 1320–65, DOI: 10.1257/aer.20131061.
- Chand R., Srivastava S., Singh J. *Changing structure of rural economy of India implications for employment and growth*, NITI Aayog, 2017, 30 p.
- Christiaensen L., Rutledge Z., Taylor J.E. *The future of work in agriculture: some reflections*, Policy Research Working Paper, 9193, World Bank, Washington DC, 2020, 27 p.
- Collinson M.A., White M.J., Ginsburg C.G. Youth migration, livelihood prospects and demographic dividend: A comparison of the census 2011 and Agincourt health and demographic surveillance system in the rural northeast of South Africa, *African Population Studies*, 2016, no. 30(2), p. 2629–39.
- Fostering inclusive rural transformation*, Rural Development Report, 2016, 378 p.
- Grigor'ev L.M., Pavlyushina V.A. Mezhranovoe neravenstvo: dinamika i problema stadij razvitiya [Intercountry inequality: dynamics and the problem of stages of development], *Voprosy ekonomiki*, 2018, no. 7, p. 5–29, DOI: 10.32609/0042-8736-2018-7-5-29. (In Russian)
- Jesus F., Connie D., Matteo L. *The declining share of agricultural employment in the People's Republic of China: how fast?* Abd economics working paper series, 2014, no. 419, 24 p.
- Johnston B.F. Association agriculture and structural transformation in developing Countries: a survey of research, *Journal of Economic Literature*, 1970, no. 8(2), p. 369–404.
- Kwan F., Wu Y., Zhuo S. Surplus agricultural labour and China's Lewis turning point, *China Economic Review*, 2018, no. 48, p. 244–257.
- Li M., Hualou L., Yingnan Z., Shuangshuang T., Dazhuan G., Xiaosong T. Agricultural labor changes and agricultural economic development in China and their implications for rural vitalization, *Journal of Geographical Sciences*, 2019, no. 29(2), p. 163–179.
- Li Y., Westlund H., Liu Y. Why some rural areas decline while some others not: An overview of rural evolution in the world, *Journal of Rural Studies*, 2019, no. 68, p. 135–143.
- Lewis W.A. Economic development with unlimited supplies of labour, *The Manchester School*, 1954, no. 22, p. 139–191.
- Narasimha R.D., Amarendra R.A., Nagaraj N., Cynthia B. *Emerging trends in rural employment structure and rural labor markets in India*, Working Paper Series, 2014, no. 56, 26 p.
- Natale F., Kalantaryan S., Scipioni M., Alessandrini A., Pasa A. *Migration in EU rural areas*, Office of the European Union, Luxembourg, 2019, 65 p.
- Naumov A.S. Sovremennoye razvitiye spetsializirovannogo sel'skogo khozyaystva v zarubezhnykh stranakh [Modern development of specialized agricultural region in foreign countries]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2012, no. 2, p. 40–48. (In Russian)
- Naumov A.S., Potapova A.A. Vliyanie mezhdunarodnoj trudovoj migracii na sovremennoe regional'noe razvitiye mirovogo sel'skogo khozyaystva [Impact of international labor migration on the modern regional development of world agriculture], *Regional'nye issledovaniya*, 2019, no. 4, p. 56–70. (In Russian)
- Pandit K., Casetti E. The shifting patterns of sectoral labor allocation during development: developed versus developing countries, *Annals of the Association of American Geographers*, 1989, no. 79 (3), p. 329–344, DOI: 10.1111/j.1467-8306.1989.tb00266.x.
- Romanus O., Oluwatoyin M., Obindah G., Toun O., Ebere N. Agriculture development, employment generation and poverty reduction in West Africa, *The Open Agriculture Journal*, 2019, no. 13, p. 82–89.
- Rostow W.W. *The stages of economic growth: a non-communist manifesto*, London, 1960, 196 p.
- Ruttan V.W. Growth stage theories and agricultural development policy, *Australian Journal of Agricultural Economics*, 1965, no. 9, p. 17–32, DOI: 10.1111/j.1467-8489.1965.tb00327.x.
- Schuh B., Maucorps A., Munch A., Brkanovic S. *Research for AGRI Committee – the EU farming employment: current challenges and future prospects*, European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels, 2019, 122 p.

- Strany BRIKS: klassifikaciya regionov* [BRICS countries: classification of regions], *Byulleten' o tekushchih tendentsiyah mirovoj ekonomiki. Vyp.*, 2018, no. 34, 20 p. (In Russian)
- Syrquin M. Patterns of structural change, *Handbook of development economics*, H. Chenery, T.N. Srinivasan (eds.), London, Elsevier BV, 1988, no. 1, p. 203–273.
- Syrquin M. Structural Change and Development, *International Handbook of Development Economics*, A.K. Dutt, J. Ros (eds.), London, Elsevier, 2008, no. 1, p. 48–67.
- Timmer C.P. The Agricultural Transformation, *Handbook of development economics*, H. Chenery, T.N. Srinivasan (eds.), Amsterdam, Elsevier, 1988, p. 275–331.
- Tipologiya zarubezhnyh stran: uchebno-metodicheskoe posobie* [Typology of foreign countries: teaching aid], A.S. Naumov, R.A. Dohov, D.S. Elmanova, F.A. Popov, A.S. Naumov (ed.), Moscow, Pelikan, 2019, 336 p. (In Russian)
- Torre A., Wallet F. *Regional development in rural areas*, Analytical tools and Public policies, Springer Briefs in Regional Science, 2016, 110 p.
- Trivelli C., Berdegue J.A. Rural transformation. Looking towards the future of Latin America and the Caribbean, 2030 – *Food, agriculture and rural development in Latin America and the Caribbean*, 2019, no. 1, 76 p.
- Tsakok I., Gardner B. Agriculture in economic development: primary engine of growth or chicken and egg? *American Journal of Agricultural Economics*, 2007, no. 89(5), p. 1145–1151.
- Vos R. *Agricultural and rural transformations in Asian development*, WIDER Working Paper, 2018, no. 87, 33 p.
- Web sources*
- FAOSTAT, Food and agriculture data, URL: <http://www.fao.org/faostat/en/#data> (access date 10.06.2021).
- ILO, Modeled estimates and projections, URL: <https://ilostat.ilo.org/resources/concepts-and-definitions/ilo-modelled-estimates/> (access date 19.05.2021).
- ILOSTAT, Statistics on the working-age population and labour force, URL: <https://ilostat.ilo.org/topics/population-and-labour-force/> (access date 16.03.2021).
- Ortiz-Ospina E., Lippolis N. Structural transformation: how did today's rich countries become “deindustrialized”? Our world in data, 2017, URL: <https://ourworldindata.org/structural-transformation-and-deindustrialization-evidence-from-todays-rich-countries> (access date 16.07.2021).
- Wells L. Mauritius, Britannica, 2021, URL: <https://www.britannica.com/place/Mauritius#ref4720> (access date 16.09.2021).
- World Bank, Open Data, Indicators, URL: <https://data.worldbank.org/> (access date 16.03.2021).
- “Zolotaya zhila” Burkina-Faso [Goldmine of Burkina Faso], Euronews, 05.12.2016 (In Russian), URL: <https://ru.euronews.com/2016/12/05/burkina-faso-wants-to-share-its-gold-wealth> (access date 17.00.2021).

Received 21.10.2021

Revised 14.02.2022

Accepted 09.03.2022

РАЗВИТИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ИНДИИ: ДОСТИЖЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Г.В. Сдасюк¹, Н.Н. Алексеева²

¹ Институт географии РАН, лаборатория географии мирового развития,
вед. науч. сотр., проф., д-р геогр. наук; e-mail: galsdas@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра
физической географии мира и геоэкологии, и. о. зав. кафедрой, доц., канд. геогр. наук; e-mail: nalex01@mail.ru

Рассматривается изменение функций основных секторов энергетики Индии как важного звена развития мирового энергетического перехода. На основе анализа статистических данных международных агентств и профильных индийских источников за 1990–2019 гг. характеризуются меняющиеся функции и соотношение энергетических секторов Индии, связанные с технологическими инновациями, их участие в эколого-экономическом развитии микс-энергетики, в том числе по реализации климатической политики и выполнению национальных обязательств в рамках Парижского соглашения по климату. Сопоставление официальных целей переходной энергетики в Индии с реальными тенденциями развития энергетических секторов позволило выявить ее проблемы и противоречия на современном этапе, в том числе связанные с экономическими ограничениями из-за пандемии COVID-19. Охарактеризован современный этап и прогнозы развития угольной промышленности – базы индустриализации Индии, которая остается ведущим сектором ее энергетики, требующим инноваций, диверсификации переработки, повышения эколого-экономической эффективности. Показан рост значения Индии как мирового нефтегазового импортера и хаба нефтепереработки. Подчеркивается доминирующая задача ускоренного развития газификации в рамках переходной энергетики. Анализируется ускоренное освоение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с приоритетными программами развития солнечной энергетики. В условиях ограниченных площадей для размещения солнечных электростанций распространяется их совмещение с водными объектами, ирригационными каналами. Отмечается целесообразность использования некусусного подхода для изучения комплекса «водные ресурсы – энергетика – продовольствие – экосистемы». Оцениваются перспективы достижения национальных обязательств Индии в рамках Парижского соглашения с учетом сложности поэтапного отказа от угля и ускорения перехода на возобновляемые источники, которое может способствовать решению многих социально-экономических проблем и улучшению состояния окружающей среды. Изучение опыта Индии свидетельствует, что эффективность переходной энергетики связана с гармонизацией развития всех секторов микс-энергетики.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, потребление электроэнергии, эмиссии парниковых газов

ВВЕДЕНИЕ

Центральная тема политических и научных дискуссий нашего времени – переходная энергетика (ПЭ) в контексте предотвращения и смягчения климатических изменений. Движущей силой потепления климата на официальном международном уровне признается углеродная энергетика, источник двух третей глобальных выбросов парниковых газов. В программах перехода к устойчивому развитию ставится цель достичь к 2050 г. «углеродной нейтральности» путем перехода использования от ископаемых углеродных ресурсов к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ). Такой переход связан с технологическим прогрессом, изменениями энергоэкономических и социально-экологических систем. По оценкам, этот сложный процесс требует колоссальных инвестиций в размере 95 трлн долл. США [Pikazo, 2020].

Принятое ООН 12 декабря 2015 г. Парижское соглашение по климату направлено на «активизацию осуществления» Рамочной конвенции ООН по изменению климата (1992). Премьер-министр Индии Н. Моди был наряду с президентом Франции Э. Макроном инициатором этого соглашения. Э. Макрон и Н. Моди получили премии «Чемпион Земли» (Champions of the Earth Award) в 2017 г. Парижским соглашением поставлена цель: удержать в этом столетии рост средней глобальной температуры «намного ниже» 2°C и «приложить усилия» для ограничения роста температуры величиной 1,5°C. Пик эмиссии CO₂ должен быть достигнут «настолько скоро, насколько это окажется возможным». Участники подписания Парижского соглашения (194 государства и Европейский Союз, 2021 г.) определяют свой вклад в достижение поставленных целей и пересматривают планы через

пятилетие. Механизмы принуждения не предусматриваются.

Независимая Индия добилась выдающихся успехов в развитии энергетики при ограниченных природных ресурсах в условиях многоукладной структуры хозяйства. Индия – главный двигатель роста мирового спроса на энергию в 2020–2040 гг.: по базовому варианту прогноза Международного энергетического агентства ее доля оценивается в 25% этого прироста [International Energy..., 2020]. По развитию ВИЭ Индия занимает второе место после Китая. Индийский опыт заслуживает особого внимания со стороны России, сохраняющей привилегированное стратегическое сотрудничество с Индией при ведущей роли сферы энергетики.

Цель статьи – выявление меняющихся функций и соотношения энергетических секторов Индии за последние десятилетия в контексте проблем формирования переходной энергетики. В задачи статьи входит анализ структуры микс-энергетики Индии, в том числе углеводородной, современного этапа ускоренного роста электроэнергетики, приоритетного развития солнечной энергетики. Ускоренное развитие ВИЭ рассматривается в контексте климатической политики и обязательств, взятых Индией в рамках Парижского соглашения по климату.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Статья базируется на фундаментальных отечественных исследованиях эволюции социально-экономической модели независимой Индии и ее энергетического хозяйства [Маляров, 2010; Сдасюк, 2021]. Критически анализируются публикации Международного энергетического агентства (МЭА), Международного агентства возобновляемой энергии, других международных организаций, материалы стратегического планирования Индии в сфере переходной энергетики.

В мире разрабатывается много сценариев перехода от углеводородной энергетики к энергетике на возобновляемых источниках. МЭА, флагман работ в этой сфере, публикует ежегодные обзоры мировой энергетики, включающие перспективы экономического развития, энергетической безопасности и охраны окружающей среды. Эти проблемы рассматриваются также Международным агентством возобновляемой энергии, Всемирным экономическим форумом по содействию эффективному энергетическому переходу (World Economic Forum Fostering Effective Energy Transition initiative) и др. Публикуемые сценарии не отличаются последовательностью и довольно противоречивы. В ежегодном Обзоре 2021 г. научно-консультативного центра BloombergNEF «Перспективы новой энергетики»

(New Energy Outlook) подчеркивается: «Энергетический переход отличается неопределенностью». Эксперты считают: «Водород, ядерная энергия и улавливание углерода могут сыграть важную роль в достижении миром нулевых показателей выбросов, и каждая из этих технологий требует дальнейшего развития» [Три сценария перехода..., 2020]. В Обзоре акцентируется необходимость увеличить ежегодные инвестиции в энергетический сектор как минимум вдвое и сделать это «как можно скорее, поскольку уже в 2050 г. доля электричества в конечном потреблении энергии повысится до 49% от современного уровня 19%» [New Energy Outlook, 2021, с. 37]. По оценкам, для достижения нулевого уровня выбросов парниковых газов в 2050 г. долю расходов на энергию следует увеличить в глобальном ВВП с 8% до 25% к 2035 г. Возможные источники капиталовложений не определяются.

В период коронавирусной пандемии трудности реализации климатического соглашения усугубились. Согласование «набора правил» для углеродных рынков достичь не удалось. В докладе ЮНЕП (2019) отмечается, что страны – участники Парижского соглашения планируют увеличивать добычу ископаемого топлива вплоть до 2040 г. [The Production Gap, 2019]. Научное обоснование альтернативных вариантов перехода к устойчивому развитию требует активизации географических и других междисциплинарных исследований. Индия представляет один из важнейших ключевых региональных объектов изучения в этой области.

Сопоставление целей развития переходной энергетики в Индии с реальными тенденциями ее развития проведено с использованием статистических данных за 1990–2019 гг., которые позволяют выявить проблемы и противоречия переходной энергетики, что необходимо для обоснования целесообразности планирования сбалансированного развития секторов микс-энергетики.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Энергетика Индии. По объему потребления энергии (6,5% мирового, 2020) Индия уступает Китаю, США и Европейскому Союзу. Современный уровень индийского душевого потребления – 626 кг в нефтяном эквиваленте – втрое ниже мирового (1860 кг). В базовом варианте прогноза МЭА на 2019 г. энергопотребление в Индии вырастет к 2040 г. почти в два раза, на ее долю придется 25% роста мирового спроса на энергию. К 2050 г. Индия обгонит США по энергопотреблению и будет уступать только Китаю. Период пандемии COVID-19 привел к нарастанию неопределенности в этой сфере. Так, до пандемии рост энергопотребления Индии в 2019–2030 гг.

предполагался на 50%, в 2021 г. он оценивался уже в 25–35%. После преодоления трудностей, вызванных пандемией, ожидается возвращение Индии на траекторию динамичного роста энергетики.

Официальные цели индийской энергетической политики – доступность энергии по приемлемым ценам, улучшение безопасности и независимости, повышение устойчивости, экономический рост [Draft National Energy Policy..., 2017]. Дефицит собственных энергетических ресурсов – одна из сложнейших проблем развития Индии, на которую приходится лишь 0,04% мировых запасов углеводородов. Рост их добычи отстает от быстрого увеличения спроса. Страна испытывает особенно острый дефицит нефтегазовых ресурсов. За счет импорта Индия удовлетворяет 82% потребностей в нефти и 50% природного газа (на 2019 г.). Ввоз нефти – крупнейшая статья индийского импорта. Уголь доминирует в индийских энергетических ресурсах, но коксующиеся и высокие сорта угля приходится импортировать. Зависимость Индии от импорта ископаемого топлива усиливается.

Структуру индийского энергопотребления составляют уголь (каменный, бурый, лигниты) – 49,6%, нефть – 28,1, природный газ – 7,3, биомасса – 11,6, возобновляемые источники энергии – 2,2, атомная энергия – 1,2% (на 2017 г.) [Strategy for New India..., 2018].

Доля традиционного топлива из биомассы в первичной энергии Индии снижается, но остается значительной: 32% в 2000 г., 17% в 2018 г. В крупных странах она не достигает и 10%. Почти половина индийского населения (около 660 млн чел.) использует для приготовления пищи дрова и хворост.

Эмиссии парниковых газов в Индии в 1990–2020 гг. колебались (как и темпы экономического роста), составляя в среднем 6,5–7,2% в год. Они опустились в период экономической рецессии 2008 г. до 3,9%. Ежегодный прирост эмиссии парниковых газов составлял 4,7% до 2008 г., после 2009 г. темпы прироста возросли до 5,5% в год, что связано с возросшим потреблением угля (с 2009 г. – на 52%) и в меньшей степени – нефти (на 37%). В структуре эмиссии углекислого газа от сжигания горючего топлива 70% приходится на уголь, 27% – на нефтепродукты, 3% – на природный газ [Trends..., 2020].

Угольная промышленность. Запасами угля Индия наделена лучше, чем другими ископаемыми энергетическими ресурсами. Они оцениваются в 286 млрд т (7% мировых запасов). Однако преобладают угли низкого качества с высокой зольностью, запасы коксующихся углей недостаточны. Развитие тяжелой промышленности, требующей высокосортные угли, вызывает увеличение их импорта, который поднялся с 67,04 млн т в 2010/11 до 248,9 млн т

в 2019/20 г. [Сдасюк, 2021]. Индия планирует покупать почти весь российский коксующийся уголь и антрацит, поставляемые на экспорт, – обсуждаются ежегодные поставки порядка 40 млн т стоимостью 4,5 млрд долл. США по текущим ценам [Зайнуллин, Скорлыгина, 2020].

По объему угледобычи Индия занимает третье место в мире. Добыча угля, главного энергетического источника и выработки электроэнергии в стране, быстро растет. Она увеличилась с 114 млн т в 1980/81 до 310 млн т в 2000/01 и до 731 млн т в 2019/20 г. при среднегодовом росте добычи 3,58% в течение последнего десятилетия.

При абсолютном росте угледобычи доля угля в структуре энергетического потребления снизилась с 80,3% в 1953/54 до 49,6% в 2017 г. Производство электроэнергии поглощает 78% добываемого угля, остальное используется в промышленности. В 2019 г. были введены мощности 8,2 ГВт угольных ТЭС, в процессе строительства находятся ТЭС мощностью 19,3 ГВт, начато сооружение новых ТЭС на 8,8 ГВт [Shearer, 2020]. В Национальном плане производства электроэнергии планируется увеличение мощности угольных ТЭС в 2022–2027 гг. на 46 ГВт. Угледобыча – важная сфера занятости населения (333 тыс. чел., 2015 г.), что чрезвычайно важно для Индии с высоким уровнем безработицы. Стремясь сделать уголь более конкурентоспособным по цене с солнечной энергией, правительство Н. Моды отказалось в 2021 г. от налога на уголь 5,61 долл. США за тонну, который взимался с добычи и импорта [Indian government..., 2020].

Для Индии крайне невыгоден проект Евросоюза (программа Fit for 55, опубликована 14.07.2021) о введении в целях борьбы с парниковыми газами «углеродного налога» (carbon tax) на ввозимые в ЕС товары. Размер налога будет определяться по объему выбросов парниковых газов на тонну продукции. В категорию продукции, облагаемой углеродным налогом, входят железо, сталь, алюминий и изделия из них, электроэнергия, удобрения, цемент. В будущем углеродный налог может быть распространен на нефтепродукты и другую продукцию. Предполагается, что импортный углеродный налог будет постепенно увеличиваться до 100% в течение 2026–2035 гг. С 2023 г. поставщики на европейский рынок должны отчитываться о выбросах парниковых газов на тонну продукции. При этом не существует четких критериев определения объемов выбросов парниковых газов разными видами производств. Весьма волатильны цены на тонну CO₂. Так, в среднем в 2019 г. они составляли 30 евро, а в 2021 г. более 50 евро [Европейская климатическая программа..., 2021]. Введение углеродного налога по существу дискриминационно в отношении стран

с соответствующими экспортными отраслями. Индия (как и Россия) относится к их числу.

Индии приходится решать противоречивые задачи дальнейшего развития угольной промышленности и снижения парниковых выбросов. Рациональное решение проблемы связано с технологическими инновациями и диверсификацией углепереработки – подземной газификацией угля, развитием углеобогачительных и коксохимических производств. Это перспективная область расширения индо-российского сотрудничества: индийские инвестиции в угледобычу России растут, целесообразно увеличение российских поставок горно-шахтного и другого оборудования в Индию.

Глобализация нефтегазовой промышленности Индии. Индия – третий крупнейший мировой потребитель и импортер нефти, четвертый крупнейший регион нефтепереработки. Импортируя нефть (в основном из стран Ближнего Востока), Индия стала одним из крупнейших мировых производителей и экспортеров нефтехимической продукции. Мощность нефтеперерабатывающей промышленности выросла с 0,3 млн т в 1950 г. до 249 млн т в 2019 г. В стране действуют 23 НПЗ, большинство которых находится близ морских портов.

Нефтегазовые ресурсы Индии ограничены: ее разведанные запасы нефти оцениваются в 5 млрд т, 0,5% мирового потенциала. Собственная нефтедобыча удовлетворяет менее $\frac{1}{5}$ потребностей страны. Индия вынуждена тратить на ввоз нефти 30–40% импортных расходов [Сдасюк, 2021]. Первостепенное значение для Индии имеет гарантированное обеспечение нефтью и газом из-за рубежа. В стране ведутся постоянные поисковые работы на нефть и газ.

На условиях соглашений о разделе продукции разведку и разработку месторождений нефти и природного газа (в основном на морском шельфе) ведут индийские и иностранные компании: британские BG Group и Cairn Energy, американская Resources, и российская «Газпром». Растут индийские капиталовложения в нефтедобывающую промышленность на Ближнем Востоке и в Африке.

На государственный сектор приходится 86% добычи нефти и 75% газа. Этим заняты четыре компании центрального правительства: Oil and Natural Gas Corporation Ltd (ONGC), ONGC Videsh Ltd (OVL), Oil India Ltd (OIL), Bharat Petroresources Ltd (BPRI).

В Индии официально ставилась задача снизить импортную зависимость нефти с 82% в 2017 г. до 67% в 2022 г. Однако действительность оказалась иной. Эта зависимость поднялась до 84% в 2018/19 г. и, по оценкам, превысит 90% к 2040 г. В Индии предполагается пятикратное увеличение числа владельцев автомобилей, что сделает ее лидером по росту спроса на нефть. Стоимость ее импорта может уд-

воиться в 2019–2030 гг. и составить 181 млрд долл. в 2030 г. с увеличением до 255 млрд долл. в 2040 г. [India's oil demand..., 2018]. Волновая динамика мировых цен на нефть оказывает большое влияние на состояние индийской экономики.

Доказанные запасы природного газа Индии оцениваются в 1340 млрд м³ (2018). Они сосредоточены преимущественно на месторождениях шельфа Аравийского моря, а также в штатах Ассам, Андхра Прадеш, Гуджарат. Транспортировку и реализацию газа осуществляет государственная корпорация Gas Authority of India, владеющая сетью газопроводов протяженностью 11 тыс. км и обеспечивающая свыше 70% всего газового рынка страны. При завершении ведущегося строительства сеть газопроводов расширится до 14 тыс. км.

Пока доля газа составляет лишь 6% индийской энергетики (на 2019 г.) при планах ее увеличения до 15% к 2030 г. Индия стремится к созданию экономики, базирующейся на газе. Зависимость страны от импорта газа растет: его доля в потреблении увеличилась с 20% в 2010 г. до 50% в 2019 г. и достигнет, по оценкам, 60% к 2040 г. Это определяет необходимость подготовки соответствующей инфраструктуры. Наряду с пятью действующими терминалами, принимающими 20 млн т сжиженного газа в год, создаются еще 11 терминалов при ожидаемом импорте 70 млн т. Индии предстоит существенно расширить газопроводную распределительную сеть, из-за недостаточности которой стоимость газа удваивается для потребителя. Страна ведет переговоры и заключает соглашения о поставках газа с Ираном, Туркменией, Бангладеш, Мьянмой.

Природный газ, наименее загрязняющий сектор углеродной энергетики, предстает как «связующий мост» углеродной и зеленой энергетики. Газификация энергоснабжения содействует решению триединой задачи удовлетворения растущего спроса на энергию, сокращения выбросов парниковых газов и уменьшения загрязнения воздуха. Развитие нефтегазовой промышленности – одна из главных сфер сотрудничества России с ее богатейшими газовыми ресурсами и Индии с ее быстрым ростом энергетических потребностей.

Электроэнергетика – ускоренный рост, приоритет солнечной энергетики. Производство и потребности в электроэнергии растут наиболее высокими темпами среди энергетических секторов. Установленная мощность электростанций (ГВт) выросла с 105,0 в 2002 г. до 365,0 в 2019 г. Ее структура: ТЭС – 229,4 (62,9%), альтернативные источники – 83,4 (22,8%), ГЭС – 45,4 (12,4%), атомные электростанции – 6,8 (1,9%). Рейтинг Индии в номинации «Легкость ведения бизнеса – доступность электроэнергии» поднялся с 137-го места в 2014 г.

на 22-е место в 2019 г. Но душевое электропотребление остается низким – 1181 кВтч при среднемировом уровне 2600 кВт·ч. Продолжение ускоренного роста электроэнергетики Индии необходимо для развития всех секторов хозяйства.

На промышленность приходится максимальная доля потребления электроэнергии и самые высокие темпы ее роста (табл.). Высокая доля электропотребления сельского хозяйства (17,67%) обусловлена массированным распространением электропомп

для откачки подземных вод, основного источника ирригации. В 2018 г. Корпорация сельской электрификации Индии оповестила о полной электрификации страны. Все регистрируемые 597 464 деревни были подключены к сетям электропередачи. Правда, деревня считается электрифицированной, если электроэнергией пользуются 10% домовладений. По оценкам, около четверти индийских домохозяйств (40 млн) в 2017 г. оставались без электричества.

Таблица

Электроэнергетика Индии: структура потребления (ГВт·ч)

Год	Промышленность	Сельское хоз-во	Коммунальное хоз-во	Торговля	Транспорт и железные дороги	Прочие	Всего
2010/11	272 589	131 967	169 326	67 289	14 003	39 218	694 392
2015/16	423 523	173 185	238 876	86 037	16 594	62 976	1 001 191
2019/20	551 362	228 172	310 151	103 883	19 577	78 348	1 291 494
Доля в 2019/20, %	42,69	17,67	24,01	8,04	1,52	6,07	100
Темпы прироста за 2010–2019/20, %	8,14	6,27	6,96	4,94	3,79	7,99	7,14

По данным: [Energy Statistics..., 2021].

Стремясь к уменьшению зависимости от импорта ископаемого топлива, Индия с 1970-х гг. предприняла исследования ресурсов ВИЭ и создание институциональной системы их использования. Индия стала первой страной, где в 1992 г. начало действовать Министерство нетрадиционных источников энергии (Ministry of Non-Conventional Energy Sources), именуемое с 2006 г. Министерством новой и возобновляемой энергии (Ministry of New and Renewable Energy). Суммарный потенциал мощностей индийских ВИЭ оценивается в 1098,8 ГВт (31.03.2020) со следующей структурой (в скобках указана потенциальная мощность ГВт): солнечная энергия – 68,3% (749), ветровая энергия – 27,5% (302), малая гидроэнергетика – 1,93% (21), биомасса – 1,6% (17,5), отходы сахарных заводов – 0,5% (5), использование мусора – 0,2% (4) [Energy Statistics..., 2021].

Освоение ВИЭ в Индии ускоряется. В 2011–2020 гг. при среднегодовых темпах роста мощности электроэнергетики 8,6% у ВИЭ они более чем вдвое выше – 19%. Мощности индийских ВИЭ (31.06.2021) достигают 96,95 ГВт, в том числе 41,1 ГВт – от солнечных установок, 39,44 ГВт – от ветряных установок, 10,3 ГВт – от биоэнергетики, 4,8 ГВт – от малой гидроэнергетики, 1,3 ГВт – от использования отходов, мусора. Проекты ВИЭ на 50 ГВт реализуются, на 27 ГВт проходят тендерные процедуры. На ВИЭ приходится 22% мощности

электроэнергетики страны (август 2021 г.). В Индии поставлена задача довести к концу 2022 г. мощности ВИЭ до 175 ГВт, к 2027 г. увеличить их до 275 ГВт, а в 2030 г. до 450 ГВт при повышении их доли до 40% в энергетическом балансе страны [India 2020. Energy Policy..., 2020]. Это самый большой в мире план развития ВИЭ. Однако выполнение планов замедляется. Планируемые 175 ГВт мощности в 2021/22 финансовом году не представляются выполнимыми.

В третьем десятилетии XXI в. солнечная энергия оценивается как самая дешевая электроэнергия в истории мира. В Обзоре мировой энергетики МЭА подчеркивается, что происходит рекордное увеличение новых мощностей солнечной энергии [IEA World Energy Outlook..., 2020]. Стоимость выработки солнечной энергии в Индии, как и во всем мире, быстро снижается. Развитие солнечной энергетики провозглашается как приоритет индийской энергетической политики. В 2010 г. начала действовать Национальная солнечная миссия (National Solar Mission) имени Дж. Неру, поставившая задачу создать к 2022 г. мощности в 20 ГВт, что было достигнуто уже в 2018 г. Солнечная энергетика развивается на импортном (в основном китайском) оборудовании, удовлетворяющем 85% ее потребностей. В 2015–2020 гг. стоимость индийского импорта оборудования СЭС составила 12,93 млрд долл. США, почти втрое больше, чем прямые иностран-

ные инвестиции 4,83 млрд долл. в развитие ВЭИ [Armaan, Karan, 2020].

Индия выступает как лидер развития солнечной энергетики на международной арене. В октябре 2015 г. на Индо-Африканском саммите в Дели Н. Модии призвал участников («сынов Солнца», Suryaputra) создать «Международный солнечный альянс» (International Solar Alliance, ISA). С 2017 г. он действует как международная межправительственная организация со штаб-квартирой в г. Гурграм (близ Дели); его задача – мобилизовать к 2030 г. 1 трлн долл. для инвестиций. Индия внесла 1 млрд рупий в качестве первоначального фонда Альянса, подписанного 121 страной.

Использование солнечной энергии открывает новые горизонты перехода к устойчивому развитию на основе центра сцепления антропогенно-природного взаимодействия – нексуса. По определению Европейской экономической комиссии, «использование нексусного подхода для комплекса “водные ресурсы – энергия – продовольствие – экосистемы” целесообразно для поощрения координации и комплексного планирования и рационального использования взаимосвязанных ресурсов в разных секторах, что может способствовать ускоренному осуществлению повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 г.» [Оптимальная практика..., 2016].

Логистические цепочки развития солнечной энергетики связаны с секторными и региональными проблемами развития хозяйственной системы Индии, решение которых требует многосторонних изменений и реорганизации. Среди этих проблем:

- развитие солнечной энергетики Индии в основном на импортном оборудовании диктует необходимость создания собственного промышленного производства;
- стабилизация функционирования электросетей определяет необходимость гармонизации развития ВИЭ и системы углеродной энергетики;
- в условиях ограниченных земельных ресурсов Индии размещение проектов СЭС, требующих больших площадей, вызывает конфликты и затрудняет развитие энергетики;
- сооружение плавучих СЭС и СЭС на ирригационных каналах представляет оптимальный вариант нексуса «вода – энергетика – земельные ресурсы», но оно удорожает строительство СЭС и усложняет их обслуживание;
- планирование развития СЭС должно включать оценку финальной стадии технологии демонтажа громоздкого, токсичного оборудования СЭС.

В период пандемии индийское правительство приняло срочные меры, направленные на восстановление траектории быстрого экономического ро-

ста. В мае 2020 г. премьер-министр Н. Моуди провозгласил национальную программу «Атманирбхар Бхарат» (Atmanirbhar Bharat) – «Самостоятельная, самодостаточная Индия». При этом подчеркивается, что самообеспечение «не означает изоляцию от мира. Прямые иностранные инвестиции и технологии приветствуются. Атманирбхар Бхарат означает быть более крупной и важной частью мировой экономики» [PM Modi..., 2020]. Развитие производства оборудования СЭС определяется как часть программы «Атманирбхар Бхарат». В апреле 2021 г. правительство распространило проект стимулирования производства (Production Linked Incentive scheme PLI) на производство солнечных модулей и ассигновало на это 602 млн долл. США. В бюджете Индии в 2021 г. был сделан упор на развитие солнечной энергетики и предусматривалось введение защитных барьеров и стимулирование развития собственного производства: с 1 апреля 2022 г. введены таможенные пошлины в размере 25% на импорт аккумуляторных батарей и 40% на импорт модулей.

Установка оборудования солнечной генерации требует тщательного выбора местоположения, эксплуатации СЭС – квалифицированного управления и слежения. В отличие от Западной Европы, где солнечные панели в основном используются индивидуально для установки на крышах домов, в Индии оказалось выгоднее создавать крупные солнечные парки, обеспеченные специальной инфраструктурой, где размещаются электростанции разных компаний.

По конституции Индии развитие электроэнергетики находится в совместной компетенции Центра и штатов, согласие которых необходимо для выделения территорий для развития ВИЭ. В стране разработаны долгосрочные программы развития ВИЭ. По «Программе развития солнечных городов», 2019 г. (Development of Solar Cities Programme), выделены 60 солнечных городов. Потребление традиционной энергии в них в течение 5 лет должно сократиться как минимум на 10% благодаря развитию ВИЭ и повышению энергетической эффективности. Принята схема развития 25 солнечных парков, где для размещения СЭС фирмам предоставляется земля, обеспеченная инфраструктурой [Kumarankandath, 2014].

Строительство СЭС наиболее быстро расширяется в пустынных районах Гуджарата и Раджастана, в засушливых районах Южной и Центральной Индии. В стране создаются крупнейшие в мире солнечные парки. Наиболее известные среди них (2020 г.): 1) Бхадла парк в Раджастане мощностью 2245 МВт на площади свыше 57 км² (самый крупный в мире); 2) Павагада в Карнатаке (2050 МВт);

3) Карнул в Андхра Прадеше (1000 МВт, 24 км²); 4) Рева (750 МВт), Мадхья Прадеш; 5) Камурти (648 МВт), введенный в действие в шт. Тамил Наду в 2017 г. и считавшийся тогда крупнейшим в мире. Камурти состоит из 2,5 млн фотоэлектрических панелей на площади 10 км².

Дефицит площадей затрудняет развитие солнечной энергетики в Индии. Размещение проектов СЭС все чаще вызывает конфликты с местным населением. Решение этой сложной проблемы облегчается «перемещением» создания СЭС с суши на воду. Сооружение СЭС на ирригационных каналах, создание плавучих СЭС на реках и водохранилищах Индии – важное новое направление развития некса «солнечная энергетика – вода». «Водные» СЭС, использующие новейшие технологии, имеют существенные эколого-экономические преимущества. Благодаря охлаждающему воздействию воды производительность панелей повышается на 12,5%. Испарение воды с поверхности водоемов снижается, их затененность препятствует разрастанию водорослей. Но стоимость сооружения СЭС на воде наполовину выше, чем наземных. Усложняется их техническое обслуживание. Контакт модулей и кабелей с водой влечет риски коррозии металлических конструкций и др.

Потенциал мощностей СЭС на ирригационных каналах оценивается в 10 ГВт из расчета, что на половине длины ирригационных каналов в 10 тыс. км на 1 км могут устанавливаться панели мощностью порядка 2 МВт (размещение наземных СЭС мощностью 10 ГВт потребовало бы 16 тыс. га). Первая СЭС мощностью 1 МВт длиной 750 м была введена в строй в 2015 г. (при проектировании с 2011 г.) на канале Сардар Нармада в дистрикте Вадодара штата Гуджарат. В 2014 г. в Индии была принята программа строительства СЭС мощностью 50 МВт на берегах ирригационных каналов (canal banks) и СЭС на 50 МВт над каналами (canal tops). С 2020 г. действуют СЭС в 35 МВт над каналами и СЭС в 15 МВт на берегах каналов [Gupta, 2021].

Плавучие СЭС (Floating Solar Projects) могут быть построены на 10–15% поверхности индийских водоемов. Их потенциал оценивается в 240–300 ГВт. Правительства многих штатов заинтересованы в создании СЭС на водоемах своих территорий. Активно выступают штаты с разветвленной речной сетью – Керала, Ассам, Одиша, Западная Бенгалия. Крупная плавучая СЭС мощностью 10 МВт построена на водохранилище ТЭС Симхадри в шт. Андхра Прадеш [Patel, 2019]. В июле 2022 г. введена в строй плавучая СЭС мощностью 100 МВт на водохранилище ТЭС Рамагандам в шт. Телангана. Правительство шт. Мадхья Прадеш объявило, что крупнейшая в мире плавучая СЭС мощностью 600 МВт, соору-

жаемая на р. Нармада, вводится в эксплуатацию в 2022/23 г. Стоимость ее строительства – 410 млн долл., финансируется Международной финансовой корпорацией и индийской государственной корпорацией электросети.

В рамках правительственной программы Ultra Mega Renewable Energy Power Park создается уникальный по масштабам и структуре «Парк возобновляемой энергетики». В пределах солончаковой пустыни на полуострове Кач шт. Гуджарат, где действуют две угольные ТЭС, водится солнечный парк общей мощностью 30 ГВт на площади 726 км² (сопоставимой с территорией Сингапура). В этом центре зеленой энергетики планируется развитие производства экологически чистого водорода в промышленных масштабах. Стоимость строительства центра оценивается в 20 млрд долл. США.

«Национальный План Водородной Энергетики» был разработан в Индии еще в 2005 г. Новый импульс развитию водородной энергетики был дан в 2020 г., когда Н. Модии объявил о создании Национальной миссии водородной энергетики (National Hydrogen Energy Mission), что было включено в индийский бюджет на 2021/22 г.

Развитие водородной энергетики, которое стало рассматриваться почти как панацея прекращения выбросов парниковых газов, при большой привлекательности (водород – самый распространенный химический элемент на планете), требует изучения и решения многих проблем, начиная с производства водорода. Источниками такого производства служат на 78% переработка природного газа и нефти, 18% – переработка угля, лишь 4% «зеленого» водорода обеспечивается ВИЭ в основном при электролизе воды. Стоимость такого производства чрезвычайно высока. Таким образом, основой получения «чистой» водородной энергетики является «грязная» углеродная энергетика.

Проект Национальной политики электроэнергетики – НЭП (Draft National Electricity Policy) (апрель 2021 г.), содержит важные положения энергетической стратегии Индии на следующие 5–10 лет. Ее цель – «использование своего топлива, которое сократит затраты тяжело зарабатываемой валюты, сделает электричество доступным для всех потребителей, поможет уменьшить волатильность развития, связанную с колебаниями глобального рынка энергетики» [Electricity policy, 2021].

Приоритет развития солнечной энергетики рассматривается в контексте целесообразности «гибридного» развития солнечно-ветровой, солнечно-биоэнергетической, солнечно-гидроэнергетической энергии, а также в связи с электроэнергией атомных электростанций, высокая экологическая эффективность которых получила признание. Лейтмотив

индийского проекта НЭП – двуединство решения задач климатических и экономических. В проекте подчеркивается взаимосвязанность процессов оптимизации микс-генераций и эффективности энергетических секторов, распределения электроэнергии, работы сетей, влияния рынка и государственного регулирования. Острая проблема – диспропорция развития: при мощностях генерации в 35 ГВт мощность трансмиссии электросетей составляет всего 24 ГВт. «Избыточная» электроэнергия не используется при ее нехватке в хозяйстве и во многих районах. Осуществление планов развития энергетики на инновационной технологической основе зависит от участия в этом ведущей энергетической корпорации НТПК, других крупных государственных и частных компаний, штатов, в ведении которых наряду с Центральным правительством находится электроэнергетика.

Переходная энергетика и климатическая политика. Развитие зеленой энергетики тесно связано с выполнением обязательств, добровольно взятых на себя Индией в рамках Парижского соглашения по климату. Страна поставила цель – к 2030 г. достичь 40% установленных мощностей производства электроэнергии от неископаемых источников, а также мощности 450 ГВт на основе ВИЭ. Кроме того, Индия берет обязательство снизить интенсивность выбросов на единицу ВВП на 33–35% по сравнению с 2005 г., а также создать дополнительный сток углерода в размере от 2,5 до 3 млрд т CO₂ за счет лесонасаждений [Lahiry, 2021].

По мнению экспертного сообщества, у Индии есть потенциал стать мировым лидером в сфере достижения цели Парижского соглашения в два градуса, учитывая поэтапный отказ от угля и ускорение перехода на возобновляемые источники, что одновременно принесет большие выгоды с точки зрения устойчивого развития, включая улучшение здоровья населения, рост занятости и оздоровление окружающей среды. Интенсивность выбросов может быть сокращена гораздо более резко, чем предполагается в обязательствах, с полностью декарбонизированным производством электроэнергии к 2050 г. [Climate Action Tracker..., 2020]. Ключевой вопрос связан с неопределенностью относительно будущего использования угольных электростанций в Индии, так как развитие угольной энергетики и запланированное увеличение мощностей ТЭС не соответствует целям Соглашения. В соответствии с подходами в рамках Соглашения производство энергии, вырабатываемой на угольных ТЭС в Индии, необходимо прекратить до 2040 г., что представляется нереалистичным. Несмотря на то что добыча угля растет и страна произвела рекордные 700 Мт угля в 2020/21 г., темпы производства энергии на угле замедлились. Индийские

эксперты оценивают эту ситуацию как кризис избыточных мощностей угольных ТЭС, ведущий к замедлению роста выбросов углекислого газа, связанного с энергетикой [Myllyvirta, 2019].

В соответствии с текущей политикой доля ВИЭ в установленной мощности в июле 2022 г. достигла 39% (включая гидроэнергетику), 37% в рамках Национальной политики электроэнергетики. Частично опираясь на гидроэнергетику и ядерную энергетику, Индия достигнет своей цели – 40% неископаемых генерирующих мощностей почти на 10 лет раньше запланированного.

Исходя из текущей политики, доля генерирующих мощностей, не связанных с ископаемым топливом, к 2030 г. может достичь 60–65%, что соответствует 40–43% доли выработки электроэнергии (рис.). Для пути, совместимого с Парижским соглашением, Индии необходимо стремиться к увеличению доли возобновляемой энергии до 65–80% в 2030 и 90% – в 2040 г., при этом 100% возобновляемой энергии можно будет достичь в период с 2040 по 2050 г. [Climate Action Tracker..., 2020]. Перенаправление субсидий с ископаемого топлива на возобновляемые источники энергии может привести к экономии затрат, а также к разнообразным

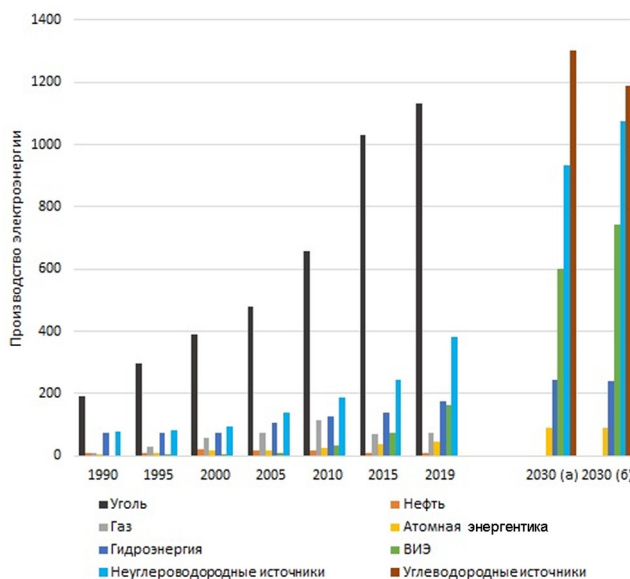


Рис. Производство электроэнергии (по источникам) в Индии в 1990–2019 г. и прогноз на 2030 г. (тыс. ГВт·ч): а – базовый сценарий; б – сценарий преимущественного развития ВИЭ.

Составлено по данным: [IEA Data and Statistics..., 2021; Renewable Power Pathways..., 2020]

Fig. Electricity production (by source) in India during 1990–2019 and forecast for 2030 (thousand GWh): а – baseline scenario; б – scenario of prior development of renewable energy sources.

Compiled from: [IEA Data and Statistics..., 2021; Renewable Power Pathways..., 2020]

сопутствующим выгодам. В течение последних лет инвестиции в ВИЭ превышали инвестиции в энергетику, связанную с ископаемым топливом. Так, в 2018 г. инвестиции Индии в солнечные фотоэлектрические системы превысили инвестиции во все источники ископаемого топлива вместе взятые [McKenna, 2019]. Крупномасштабные аукционы способствовали быстрому развитию возобновляемых источников энергии при быстро снижающихся ценах (например, стоимость мощностей солнечной энергии установлена в среднем 34 долл./МВт·ч, в то же время стоимость производства электроэнергии на угле составляет 45 долл./МВт·ч (2018–2019), что делает солнечную энергию дешевле, при том что разница в стоимости между падающими аукционными ценами на энергию Солнца и ветра и увеличением стоимости выработки электроэнергии на угле увеличивается).

Таким образом, проводимая Индией политика энергетического перехода способствует достижению целей Парижского соглашения на основе применяемых в настоящее время политических мер. По некоторым прогнозам, у Индии есть возможность обновить и принять более амбициозные цели, ускорив переход от угля к возобновляемым источникам энергии, в том числе для достижения целей, совместимых с удержанием средней глобальной температуры в 1,5 градуса.

ВЫВОДЫ

Эволюция переходной энергетики Индии связана с развитием новых технологических укладов, что требует интегрального изучения и учета при разработке перспективных программ ПЭ. Пока такие программы разрабатываются преимущественно по секторному принципу.

Индия остается в обозримой перспективе одной из крупнейших угледобывающих стран, импортирующей высокосортные угли. Переход к устойчивому развитию требует разработки и осуществления программ инноваций, направленных на повышение производительности и экологической эффективности предприятий угольной промышленности.

Введение «углеродного налога» противоречит экономическим интересам Индии – развитию ее тяжелой индустрии, основ хозяйства, опирающихся на использование ископаемых топливно-энергетических ресурсов.

Роль Индии, имеющей ограниченные нефтегазовые ресурсы, усиливается как их мирового импортера и хаба экспорта продукции нефтепереработки. Тенденции развития нефтяной промышленности Индии оказывают существенное воздействие на географию ее развития в мире, регионах, а также в России, активно сотрудничающей с Индией в области энергетики.

При ускоренном развитии солнечной энергетики Индия сталкивается с многосторонними проблемами, включая ограниченность площадей для размещения СЭС. Большое значение имеет распространение совмещения СЭС с водными системами в соответствии с нехитрым подходом «энергетика – вода».

Изучение развития ПЭ Индии свидетельствует о необходимости сочетания линейных моделей секторного энергетического развития с региональными циркулярными социально-экономическими моделями и природно-экологическими структурами. Это требует разработки современных систем интегрального районирования, использования больших данных и создания соответствующих систем управления.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках темы Госзадания Института географии РАН № 0148-2019-0008 и Госзадания «Анализ региональных геоэкологических проблем в условиях глобальных изменений окружающей среды» кафедры физической географии мира и геоэкологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Маляров О.В. Независимая Индия: Эволюция социально-экономической модели и развитие экономики: в 2 кн. М.: Ин-т востоковедения РАН, 2010. 775 с.
- Оптимальная практика и принципы межсекторального взаимодействия в деле освоения ВИЭ: нехитрый подход к взаимосвязи «вода – энергия – продовольствие – экосистемы» в целях поддержки целей в области устойчивого развития. Записка секретариата Европейской экономической комиссии. Комитет по устойчивой энергетике. ECE/Energy/GE.7. 2016. № 6. 24 с.
- Сдасюк Г.В. Новая Индия. География развития: достижения, проблемы, перспективы. М.: Канон+ РООИ «Реабилитация», 2021. 520 с.
- Draft National Energy Policy, NITI Aayog Government of India, Version 26.07.2017, New Delhi, 2017, 106 p.
- Energy Statistics, India 2021, Ministry of Statistics and Programme Implementation, New Delhi, 2021, 112 p.
- India 2020. Energy Policy Review, IEA, 2020, 305 p.
- Renewable Power Pathways: modelling the integration of wind and solar in India by 2030, TERI, 2020, 66 p.

- Strategy for New India*, NITI Aayog Government of India, 2018, p. 61.
- Trends in global CO₂ and total greenhouse gases emissions*, 2017 Report, PB L Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague, 2017, 69 p.
- Trends in global CO₂ and total greenhouse gases emissions*, 2020 Report, PB L Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague, 2020, 85 p.
- Электронные ресурсы**
- Европейская климатическая программа Fit for 55. URL: <https://globalenergyprize.org/ru/2021/07/14/evropejskaya-klimaticheskaya-programma-fit-for-55/> (дата обращения 25.07.2021).
- Зайнуллин Е., Скорлыгина Н. Хинди-руси уголь-уголь // Коммерсантъ. 24.08.2020. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4465798> (дата обращения 15.06.2021).
- Три сценария перехода к декарбонизации энергетики. BloombergNEF. 27 июля 2021. URL: <https://ecosphere.press/2021/07/27/tri-sczenariya-perehoda-k-dekarbonizaczii-energetiki/> (дата обращения 04.08.2021).
- Armaan R.M., Karan R. India's solar future: Domestic first, international second, September 4, 2020, URL: <https://www.pv-magazine-india.com/indias-solar-future-domestic-first-international-second/> (дата обращения 08.08.2021).
- Climate Action Tracker, India, URL: <https://climateaction-tracker.org/countries/india/> (дата обращения 03.09.2021).
- Electricity policy*, Dawn, Editorial, Published June 24, 2021, URL: <https://www.dawn.com/news/1631184> (дата обращения 25.07.2021).
- Gupta U. India may add 7 GW of PV in 2021, URL: <https://www.pv-magazine.com/2021/05/28/india-may-add-7-gw-of-pv-in-2021/> (дата обращения 25.07.2021).
- IEA World Energy Outlook 2020, URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> (дата обращения 30.07.2021).
- IEA Data and Statistics. Electricity generation by source, India, 1990–2019, URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=INDIA&energy=Electricity&year=1990> (дата обращения 28.07.2021).
- Indian government proposes waiving carbon tax on coal, 02.01.2020, URL: <http://www.sxcoal.com/news/4604471/info/en> (дата обращения 08.07.2021).
- India's oil demand to climb to 500 mln tonnes per year by 2040: Indian Oil, September 25, 2018. URL: <https://www.reuters.com/article/us-asia-oil-appec-india/india-as-oil-demand-to-climb-to-500-mln-tonnes-per-year-by-2040-indian-oil-idUSKCN1M50EG> (дата обращения 25.07.2021).
- Kumarankandath A. India to get 25 solar parks, Down to Earth, 01 December 2014, URL: <https://www.downtoearth.org.in/news/india-to-get-25-solar-parks-47662> (дата обращения 15.06.2021).
- Lahiry S. Paris Agreement and India's climate change challenges, Down to Earth, URL: <https://www.downtoearth.org.in/blog/climate-change/paris-agreement-and-india-s-climate-change-challenges-57000> (дата обращения 25.07.2021).
- McKenna P. India Is Now Investing More in Solar than Coal, but Will Its Energy Shift Continue? Inside Climate News, URL: <https://insideclimatenews.org/news/20052019/india-solar-investment-coal-modi-election-renewable-energy-future> (дата обращения 07.08.2021).
- Myllyvirta L. Analysis: India's CO₂ emissions growth poised to slow sharply in 2019, Carbon Brief, 24 October 2019, URL: <https://www.carbonbrief.org/analysis-indias-co2-emissions-growth-poised-to-slow-sharply-in-2019> (дата обращения 25.06.2021).
- New Energy Outlook, 2021, URL: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/> (дата обращения 28.07.2021).
- Patel M. Floating solar power plants: An idea whose time has come, May 22, 2019, URL: <https://energy.economictimes.indiatimes.com/energy-speak/floating-solar-power-plants-an-idea-whose-time-has-come/3582> (дата обращения 25.07.2021).
- Picazo M. Transitioning to 100% renewable energy by 2050 would pay for itself, URL: <https://www.theweathernetwork.com/ca/news/article/100-percent-renewable-energy-by-2050-would-pay-for-itself-in-7-years> (дата обращения 15.07.2021).
- PM Modi calls for self-reliant India, lays down 5 pillars Times of India.com, May 12, 2020, URL: <https://timesofindia.indiatimes.com/india/pm-modi-lists-5-pillars-of-self-reliant-india/articleshow/75700425.cms> (дата обращения 25.07.2021).
- Shearer C. Analysis: The global coal fleet shrank for first time on record in 2020, Carbon Brief, URL: <https://www.carbonbrief.org/analysis-the-global-coal-fleet-shrank-for-first-time-on-record-in-2020> (дата обращения 15.08.2021).
- The Production Gap: The discrepancy between countries planned fossil fuel production and global production levels consistent with limiting warming to 1,5°C or 2°C, UNEP/SEI, 2019, URL: <http://productiongap.org/> (дата обращения 25.07.2021).

Поступила в редакцию 14.09.2021

После доработки 15.02.2022

Принята к публикации 09.03.2022

DEVELOPMENT OF TRANSITIONAL ENERGY IN INDIA: ACHIEVEMENTS, CHALLENGES AND PROSPECTS

G.V. Sdasyuk¹, N.N. Alekseeva²

¹ *Institute of Geography RAS, Laboratory of World Development Geography,
Leading Scientific Researcher, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: galsdas@mail.ru*

² *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of World Physical Geography and Geoecology,
Acting Head of the Department, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: nalex01@mail.ru*

Changing functions of the main energy sectors in India as an important element of the global energy transition are considered. Based on the analysis of statistical data of international agencies and specialized Indian sources for 1990–2019, the article describes changing functions and ratio of India's energy sectors in relation to technological innovation, their participation in the ecological and economic development of "mix-energy", including the implementation of climate policy and national commitments under the Paris Climate Agreement. Comparison of the official goals of transitional energy in India with the real development of energy sectors made it possible to identify the present-day problems and contradictions, including those associated with economic constraints due to the COVID-19 pandemic. The current stage and forecasts of the coal industry development are discussed. It is the base of industrialization in India, still being the leading sector of its energy sector, which require innovation, diversification of processing, and increasing environmental and economic efficiency. The growing importance of India as a world's oil and gas importer and an oil refining hub is shown. The dominant task of accelerated gasification within the framework of transitional energy is emphasized. The article analyzes the advanced development of renewable energy sources (RES) with priority programs for the development of solar energy. Because of the limited areas for solar power plants, these are more often combined with water bodies and irrigation canals. The study discusses the expediency of a nexus approach to studying "water resources – energy – food – ecosystems" complex. The prospects for achieving India's national commitments under the Paris Agreement are assessed, taking into account the complexity of phasing out coal and the accelerated transition to renewable sources, which can help to solve lots of socio-economic problems and improve the state of the environment. The India's experience shows that the efficiency of transitional energy is closely related to the harmonization of the development of all "mix-energy" sectors.

Keywords: renewable energy sources, electricity consumption, greenhouse gas emissions

Acknowledgements. The study was carried out within the framework of the state-financed Theme 0148-2019-0008 (Institute of Geography RAS) and under the state assignment Analysis of regional geoecological problems under the global environmental change (Department of World Physical Geography and Geoecology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University).

REFERENCES

- Draft National Energy Policy*, NITI Aayog Government of India, Version 26.07.2017, New Delhi, 2017, 106 p.
- Energy Statistics, India 2021*, Ministry of Statistics and Programme Implementation, New Delhi, 2021, 112 p.
- India 2020, Energy Policy Review*, IEA, 2020, 305 p.
- Malyarov O.V. *Nezavisimaja Indija: evolucija social'no-ekonomicheskoi modeli i razvitie ekonomiki*, v 2 kn. [Independent India: Evolution of the Socio-Economic Model and Development of Economy, in 2 books], Moscow, In-t Vostokovedenija RAN, 2010, 775 p. (In Russian)
- Optimal'naja praktika i principy mezhsektoral'nogo vzaimodejstvija v dele osvoenija VIJe: neksusnyj podhod k vzaimosvjazi "voda – energija – prodovol'stvie – ekosistemy" v celjah podderzhki celej v oblasti ustojchivogo razvitija* [Best practices and principles of intersectoral interaction in the development of renewable energy sources: a nexus approach to "water – energy – food – ecosystems" interrelations for supporting the Sustainable Development Goals], Zapiska sekretariata Evropejskoj ekonomicheskoi komissii, Komitet po ustojchivoj energetike [Note of the Secretariat of the Economic Commission for Europe, Sustainable Energy Committee], ECE/ Energy/GE.7/2016/6, 24 p. (In Russian)
- Renewable Power Pathways: modelling the integration of wind and solar in India by 2030*, TERI, 2020, 66 p.
- Sdasyuk G.V. *Novaja Indija. Geografija razvitija: dostizhenija, problemy, perspektivy* [New India. Geography of development: achievements, problems, prospects], Moscow, Kanon+ ROOI "Reabilitacija", 2021, 521 p. (In Russian)
- Strategy for New India*, NITI Aayog, New Delhi, 2018, 61 p.
- Trends in global CO₂ and total greenhouse gases emissions, 2017 Report*, PB L Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague, 2017, 69 p.
- Trends in global CO₂ and total greenhouse gases emissions, 2020 Report*, PB L Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague, 2020, 85 p.
- Web sources**
- Armaan R.M., Karan R. *India's solar future: Domestic first, international second*, URL: <https://www.pv-magazine-india.com/2020/09/04/indias-solar-future-domestic-first-international-second/> (access date 08.08.2021).
- Climate Action Tracker*, India, URL: <https://climateaction-tracker.org/countries/india/> (access date 03.09.2021).

- Electricity policy*, Dawn, Editorial, Published June 24, 2021, URL: <https://www.dawn.com/news/1631184> (access date 25.07.2021).
- Gupta U. *India may add 7 GW of PV in 2021*, URL: <https://www.pv-magazine.com/2021/05/28/india-may-add-7-gw-of-pv-in-2021/> (access date 25.07.2021).
- Indian government proposes waiving carbon tax on coal*, 02.01.2020, URL: <http://www.sxcoal.com/news/4604471/info/en> (access date 08.07.2021).
- Evropejskaja klimatičeskaja programma Fit for 55* [European Climate Program Fit for 55], URL: <https://global-energyprize.org/ru/2021/07/14/evropejskaja-klimatičeskaja-programma-fit-for-55/> (access date 08.07.2021). (In Russian)
- IEA World Energy Outlook 2020*, URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> (access date 30.07.2021).
- IEA Data and Statistics, Electricity generation by source, India, 1990–2019*, URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=INDIA&energy=Electricity&year=1990> (access date 28.07.2021).
- India's oil demand to climb to 500 mln tonnes per year by 2040, *Indian Oil*, September 25, 2018. URL: <https://www.reuters.com/article/us-asia-oil-appec-india/indias-oil-demand-to-climb-to-500-mln-tonnes-per-year-by-2040-in-indian-oil-idUSKCN1M50EG> (access date 25.07.2021).
- Kumarankandath A. *India to get 25 solar parks*, Down to Earth, 01 December 2014, URL: <https://www.downtoearth.org.in/news/india-to-get-25-solar-parks-47662> (access date 15.06.2021).
- Lahiry S. *Paris Agreement and India's climate change challenges*, Down to Earth, URL: <https://www.downtoearth.org.in/blog/climate-change/paris-agreement-and-india-s-climate-change-challenges-57000> (access date 25.07.2021).
- McKenna P. *India Is Now Investing More in Solar than Coal, but Will Its Energy Shift Continue?* Inside Climate News, URL: <https://insideclimatenews.org/news/20052019/india-solar-investment-coal-modi-election-renewable-energy-future> (access date 07.08.2021).
- Myllyvirta L. *Analysis: India's CO2 emissions growth poised to slow sharply in 2019*, Carbon Brief, 24 October 2019, URL: <https://www.carbonbrief.org/analysis-indias-co2-emissions-growth-poised-to-slow-sharply-in-2019> (access date 25.06.2021).
- New Energy Outlook, 2021*, URL: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/> (access date 28.07.2021).
- Patel M. *Floating solar power plants: An idea whose time has come*, URL: <https://energy.economictimes.indiatimes.com/energy-speak/floating-solar-power-plants-an-idea-whose-time-has-come/3582> (access date 25.07.2021).
- Picazo M. *Transitioning to 100% renewable energy by 2050 would pay for itself*, URL: <https://www.theweathernetwork.com/ca/news/article/100-percent-renewable-energy-by-2050-would-pay-for-itself-in-7-years> (access date 15.07.2021).
- PM Modi calls for self-reliant India, lays down 5 pillars* Times of India.com, May 12, 2020, URL: <https://timesofindia.indiatimes.com/india/pm-modi-lists-5-pillars-of-self-reliant-india/articleshow/75700425.cms> (access date 25.07.2021).
- Shearer C. *Analysis: The global coal fleet shrank for first time on record in 2020*, Carbon Brief, <https://www.carbonbrief.org/analysis-the-global-coal-fleet-shrank-for-first-time-on-record-in-2020> (access date 15.08.2021).
- The Production Gap: The discrepancy between countries planned fossil fuel production and global production levels consistent with limiting warming to 1.5°C or 2°C*, UNEP/SEI, 2019, URL: <http://productiongap.org/> (access date 25.07.2021).
- Tri scenarija prehoda k dekarbonizaciji energetiki*, BloombergNEF, 27 Iyulya, 2021 [Three scenarios for the transition to decarbonization of energy, BloombergNEF, 27 July, 2021], URL: <https://ecosphere.press/2021/07/27/tri-scenariya-prehoda-k-dekarbonizaczii-energetiki/> (access date 04.08.2021). (In Russian)
- Zajnullin E., Skorlygina N. *Hindi-rusi ugol' - ugl'* [Hindi-rusi coal-coal], Kommersant, 24.08.2020, URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4465798> (access date 15.06.2021). (In Russian)

Received 14.09.2021

Revised 15.02.2022

Accepted 09.03.2022

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.79

ВОЗРАСТ ХВАЛЫНСКОГО ПРОЛИВА В ПОЗДНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВОЙ ИСТОРИИ МАНЫЧСКОЙ ДЕПРЕССИИ

Д.В. Семиколенных¹, Р.Н. Курбанов², Т.А. Янина³

¹ Институт географии РАН, отдел палеогеографии четвертичного периода

^{2,3} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена

² Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН

¹ Аспирант; e-mail: aristova@igras.ru

² Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: kurbanov@igras.ru

³ Зав. лабораторией, д-р геогр. наук; e-mail: paleo@inbox.ru

В конце позднего плейстоцена в Каспии развивалась раннехвалынская трансгрессия с максимальными отметками уровня 45–50 м. При превышении высоты водораздела с Азово-Черноморским бассейном произошло открытие пролива, главным звеном которого стала Манычская депрессия – обширное понижение на юге Восточно-Европейской равнины. Несмотря на длительную историю изучения региона, мнения исследователей относительно возраста отложений раннехвалынского пролива расходятся. До сих пор время функционирования пролива однозначно не соотносено с глобальной хроностратиграфической схемой. В статье представлены результаты датирования методом оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ) нижнехвалынских отложений, вскрытых в береговом обнажении западной оконечности о. Левый в центральной части Манычской депрессии. Получены девять датировок: шесть из них характеризуют аквальные этапы развития территории, три – субаэральные. Биостратиграфический анализ малакофауны подтвердил принадлежность вскрытых в разрезе морских отложений раннехвалынской трансгрессии Каспийского моря. По результатам датирования определено время проникновения в Манычскую депрессию раннехвалынских вод в период 18–14 тыс. лет назад, что отвечает эпохе деградации поздневалдайского оледенения (осташковская стадия, МИС 2). Субаэральное осадконакопление началось на территории центральной части Манычской депрессии в начале голоцена.

Ключевые слова: поздний плейстоцен, раннехвалынская трансгрессия, ОСЛ-датирование, малакофауна, Каспийское море

ВВЕДЕНИЕ

В конце позднего плейстоцена в Каспии развивалась раннехвалынская трансгрессия с максимальными отметками уровня 45–50 м. При превышении высоты водораздела с Азово-Черноморским бассейном произошло открытие пролива, главным звеном которого стала Манычская депрессия – обширное понижение на юге европейской части России.

Нижнехвалынские отложения широко развиты на всем протяжении Манычской депрессии и характеризуются наличием в их составе тафоценоза раннехвалынского малакофаунистического комплекса. Впервые раннехвалынские виды моллюсков в отложениях Маныча были описаны в береговом обнажении у оз. Грузского В.В. Богачевым [1903], позднее изучением отложений раннехвалынского пролива занимались Г.И. Горецкий [1953], Г.И. Попов [1983], П.В. Федоров [1978], А.А. Свиточ [Свиточ и др., 2008, 2009, 2010, 2011], Т.А. Янина

[2006, 2012], Е.Н. Бадюкова [2011], А.Л. Чепалыга [Чепалыга и др., 2005] и др. Мнения исследователей относительно стратиграфического расчленения отложений расходятся. Так, П.В. Федоров [1978], Г.И. Попов [1983], Т.А. Янина [2012] подразделяют нижнехвалынские отложения на два горизонта, которые соответствуют двум террасовым уровням: нижний (абескунский) горизонт, залегающий выше буртасских отложений, и верхний, прислоненный к буртасской террасе. По представлению А.А. Свиточа и др. [2009], хвалынские отложения Маныча представляют собой единую разнофациальную толщу, расположенную на высоте до 35 м. А.Л. Чепалыга с соавторами [2005] выделяют три эпизода сброса каспийских вод, которым соответствуют три генерации аккумулятивных форм в Манычской депрессии.

Также существуют разногласия между исследователями при соотношении времени существова-

ния раннехвалынского пролива с глобальной хроностратиграфической схемой. Г.И. Попов [1983] и А.В. Мамедов [Mamedov, 1997] относят этот этап к брянскому межстадиалу. Г.И. Рычагов [2014] сопоставляет раннехвалынскую трансгрессию Каспия с калининской стадией валдайского оледенения.

Первые радиоуглеродные датировки по фауне раннехвалынских моллюсков Маныча были получены в 2000 г. в НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена МГУ [Свиточ, Парунин, 2000; Свиточ, Янина, 2001]. В 2008–2009 гг. Х.А. Арслановым получена серия дат по ряду естественных разрезов [Arslanov, Yanina, 2008; Cherpalyga et al., 2009] и одна дата – методом УМС радиоуглеродного датирования в Университете Гронингена (Нидерланды) [Свиточ и др., 2008, 2009]. В 2010 г. на основе имеющихся результатов радиоуглеродного датирования опубликована работа, где с помощью гидрологической модели был сделан вывод, что открытие Манычского пролива в раннехвалынское время могло осуществиться в промежутке между 15,2 и 12,3 тыс. лет назад [Thom, 2010]. А.А. Свиточ и Р.Р. Макшаев [2017], также обобщив все существующие на тот момент геохронологические данные, установили, что проникновение вод хвалынской трансгрессии Каспия в Азово-Черноморский водоем началось около 15 тыс. лет назад и закончилось не ранее 10,5 тыс. лет назад.

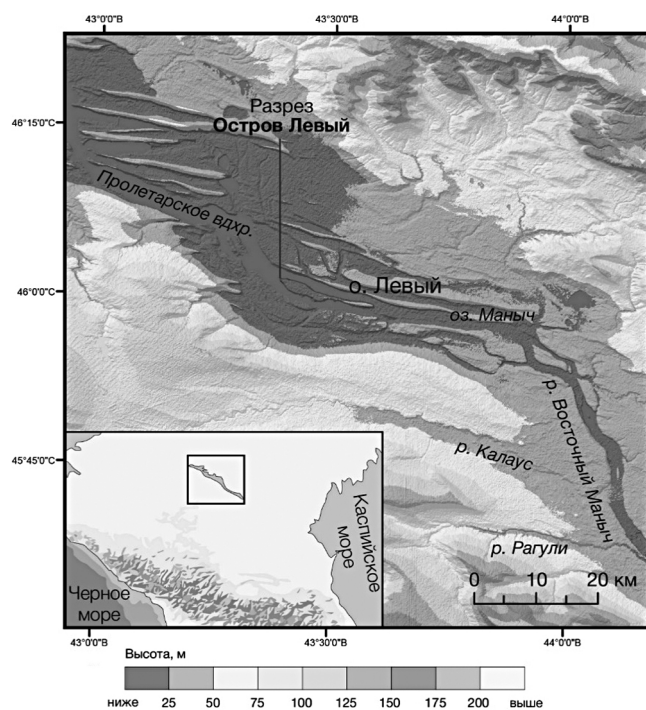


Рис. 1. Местоположение разреза Остров Левый (Манычская депрессия)

Fig. 1. Location of the Levyi Ostrov section (the Manych depression)

Проблема радиоуглеродного датирования заключается в том, что для его проведения необходимо некоторое количество органического материала. В случае с отложениями раннехвалынского пролива в Манычской депрессии датировать возможно лишь маломощные слои, в которых заключена редкая хвалынская фауна моллюсков, отличающаяся небольшими размерами и тонкостворчатостью. В настоящее время геохронология раннехвалынского этапа Манычской депрессии построена на разрозненных датировках прослоев с хвалынской фауной различных береговых обнажений, что затрудняет определение временного интервала функционирования пролива, выделения этапов его развития, корреляцию и сопоставление с глобальными и региональными геохронологическими шкалами.

Цель настоящей работы – создание детальной хронологической схемы наиболее полного разреза нижнехвалынских отложений [Свиточ и др., 2009, 2010] верхнего (аккумулятивного) горизонта [Попов, 1983], вскрывающегося в береговом обнажении западной оконечности о. Левый центральной части Манычской депрессии, на основе датирования методом оптически стимулированной люминесценции.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Разрез Остров Левый (N46°01'38,0, E43°23'05,9; Набс – 22,4 м) расположен в западной оконечности о. Левый оз. Маныч на территории Республики Калмыкия (рис. 1). Относительная высота разреза над урезом оз. Маныч – 6–7 м. Остров Левый представляет собой субшироко вытянутую положительную форму рельефа – гряды с пологонаклонной или местами субгоризонтальной слабоволнистой поверхностью, его длина достигает 16 км, средняя ширина составляет 250 м (максимальная – 1 км). Гряда сложена глинистыми осадками древнего буртасского озера [Свиточ, Хоменко, 2009], перекрытыми делювиальным и элювиальным чехлом с прислоненными отложениями хвалынской трансгрессии.

Разрез (рис. 2) детально описан, проведены малакофаунистический и геохронологический анализы. Изучение включений фауны моллюсков выполнено в НИ лаборатории новейших отложений и палеогеографии плейстоцена географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова с целью биостратиграфического обоснования геологического возраста осадков и реконструкции палеоэкологических условий их накопления. Малакофаунистический анализ традиционно является основой стратиграфии плейстоценовых отложений южных морей России.

Абсолютная хронология получена методом оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ). Датирование разновозрастных отложений разреза

Остров Левый выполнено в Скандинавской лаборатории люминесцентного датирования Орхусского университета. Отбор образцов выполнялся в темное время суток в светонепроницаемые пакеты, чтобы исключить воздействие света на образцы, отдельно отбирался материал для гамма-спектрометрического анализа. Предварительная подготовка проб проводилась в НИ лаборатории новейших отложений и палеогеографии плейстоцена географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова по принятому в Орхусском университете протоколу [Курбанов и др., 2019]. Образцы из раннехвалынских отложений представлены тонко- и среднезернистыми песками, алевритами и опесчаненными глинами. После стандартной процедуры подготовки проб [Murray, Wintle, 2000], которая включает в себя влажное ситование, последовательную обработку выбранной фракции 10% растворами перекиси водорода, соляной и плавиковой кислот, разделение

кварца и калиевых полевых шпатов (КПШ) сепарационным методом при помощи тяжелой жидкости (поливольфрамат натрия), был применен стандартный протокол измерения эквивалентной дозы (SAR) [Murray, Wintle, 2003]. Люминесцентное датирование проводилось по зернам кварца размером 180–250 микрон. Эквивалентная доза измерялась для 18–24 аликвот на стандартном ТЛ/ОСЛ-ридере Risø (модель DA-20) с помощью стимуляции голубым светом при 125°C с предварительным нагревом до 260°C. Для построения кривой насыщения и определения эквивалентной дозы зерна подверглись воздействию излучения бета-источника – изотопа стронция-90.

Определение скорости накопления дозы (активности радионуклидов) в образцах выполнено на высокоточном гамма-спектрометре с полупроводниковым детектором на основе особо чистого германия по методике [Murray et al., 1987].

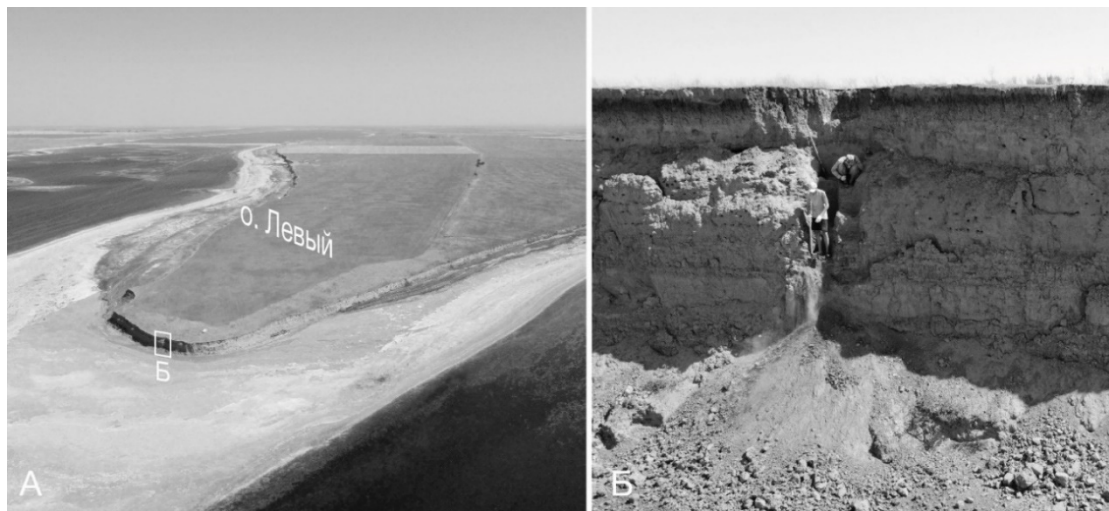


Рис. 2. Разрез Остров Левый (Манычская депрессия)

Fig. 2. Levyi Ostrov section (the Manych Depression)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В разрезе Остров Левый (рис. 3) в основании вскрываются темно-серо-коричневые глины видимой мощностью до 0,20 м (слой 7). Выше с четкой границей в интервале 5,00–3,65 м залегают палевые тонкозернистые алевритистые пески (слой 6), переслаивающиеся с маломощными прослоями коричневых (похожих на шоколадные) глин, граница с вышележащим слоем нечеткая. Над ними, до глубины 3,00 м, располагается горизонтально-слоистая толща (слой 5) переслаивающихся палевых песков, сизых и коричневых глин с пятнами ожелезнения и марганцевания, переход в вышележащий слой четкий. Слой 4 в интервале 3,00–1,35 м представлен

светло-бежевым тонко-волнисто-косослоистым хорошо сортированным кварцевым среднезернистым песком, в верхней части слоя – включения фауны каспийских моллюсков. Выше с четкой эрозионной границей до 1,15 м залегает уплотненный лессовидный суглинок (слой 3) темно-бежевый с четкой столбчатой отдельностью и мощным прослоем (до 5 см) карбонатных образований в подошве, граница с вышележащим слоем четкая. В интервале 1,15–0,45 м вскрывается палевый лессовидный плотный суглинок (слой 2), с крупной столбчатой отдельностью, с глубины 0,40 м плавно переходит в современную почву.

В разрезе Остров Левый в толще горизонтально-слоистых, хорошо сортированных среднезернистых песков на глубине 1,6–1,3 м обнаружи-

ваются редкие мелкие раковины (рис. 4) *Didacna protracta protracta*, *D. ebersini*, *D. subcatillus subcatillus*, *Dreissena polymorpha*, *Hypanis plicata*, располагающиеся в отложениях тонким слоем. Наличие *D. protracta protracta* и *D. ebersini* дают основание охарактеризовать данный малакофаунистический комплекс как раннехвалынский. Малакофаунистический состав указывает на со-

леность водоема около 11–13‰, что близко к солености современного Среднего Каспия, однако угнетенный вид раковин указывает на то, что акватория пролива была, по-видимому, несколько опреснена, возможно, за счет привноса пресных вод местными реками. Результаты малакофаунистического анализа отложений представлены в табл. 1.

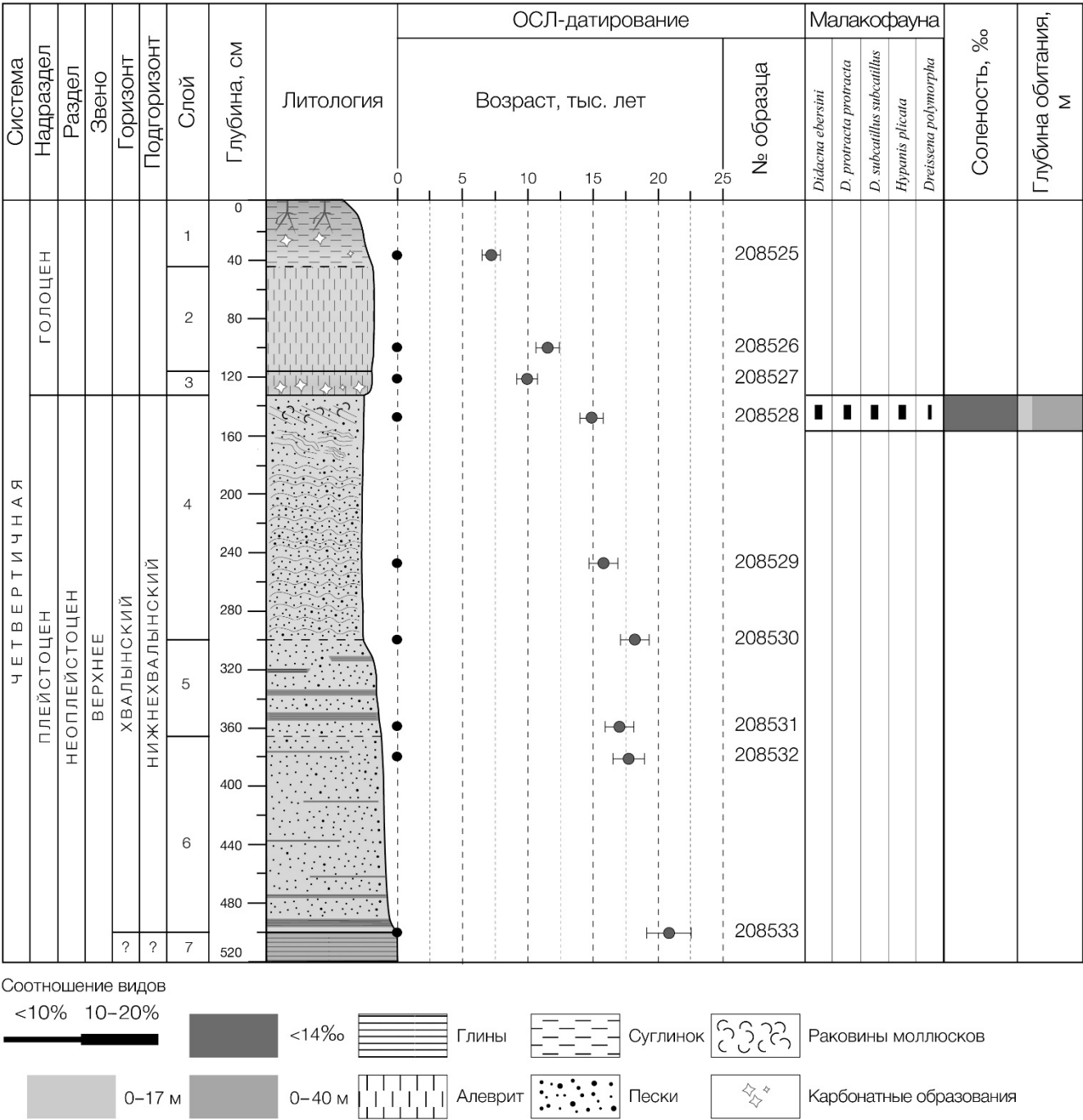


Рис. 3. Строение разреза Остров Левый и результаты малакофаунистического анализа и ОСЛ-датирования

Fig. 3. Structure of the Levii Ostrov section and the results of malacofaunistic analysis and OSL dating

Таблица 1

Малакофаунистический состав отложений разреза Остров Левый

№	Вид	Семейство	Отложения	Бассейн	Соленость, ‰	Глубина, м
1	<i>Didacna ebersini</i>	Cardiidae	Раннехвалынские	Каспий	5–7	–
2	<i>Didacna protracta protracta</i>	Cardiidae	Раннехвалынские	Каспий	11–13	–
3	<i>Didacna subcatillus subcatillus</i>	Cardiidae	Гирканские, раннехвалынские	Каспий	–	–
4	<i>Dreissena polymorpha</i>	Dreissenidae	Вехнечетвертичные отложения Понто-Каспия	Понто-Каспий	≤13	≤10
5	<i>Hypanis plicata</i>	Cardiidae	Древне- и новозвксинские, хвалынские	Понто-Каспий	4–13	0–40

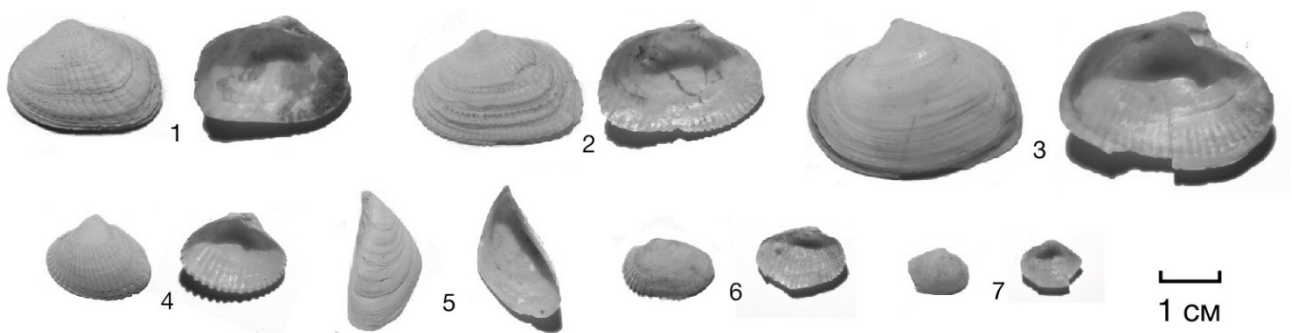


Рис. 4. Раковины моллюсков из разреза Остров Левый:

1, 2, 3 – *Didacna protracta protracta*; 4 – *D. ebersini*; 5 – *Dreissena polymorpha*; 6 – *Hypanis plicata*; 7 – *D. subcatillus subcatillus*

Fig. 4. Shells of mollusks from the Levyi Ostrov section:

1, 2, 3 – *Didacna protracta protracta*; 4 – *D. ebersini*; 5 – *Dreissena polymorpha*; 6 – *Hypanis plicata*; 7 – *D. subcatillus subcatillus*

Абсолютный возраст отложений разреза Остров Левый был получен на основе результатов датирования девяти образцов: трех отобранных из континентальных осадков (208525–208527), пяти – из морских (208528–208532) и одного на границе морских осадков и толщи темных глин в основании разреза (208533). Также был отобран образец из вышеуказанных глин, однако получить необходимое количество материала для датирования не удалось ввиду тонко-дисперсности осадка. Скорость накопления дозы рассчитана по результатам измерения активности образцов на гамма-спектрометре (табл. 2). Содержание радионуклидов имеет закономерное распределение по разрезу: повышенные значения отмечаются в образцах из слоев, обогащенных глинистыми частицами (2,4–3,4 Гр/тыс. лет), в то время как для хорошо сортированных песков характерно их низкое количество (1,8–2,1 Гр/тыс. лет). Первые три образца (208525–208527) были отобраны из толщи континентальных осадков – современной суглинистой почвы и лессовидных суглинков, они

характеризуются повышенной скоростью накопления дозы относительно других образцов, что в целом характерно для подобного типа отложений. Наименьшую радиоактивность демонстрируют хорошо сортированные кварцевые пески с включением прослоя малакофауны. Ниже по разрезу образцы отбирались из плохо сортированных алевролитистых песков, местами с примесью глин и из глин, что закономерно отражается в увеличении скорости накопления дозы.

Анализ соотношения радионуклидов по слоям дает возможность выделения интервалов с различным участием областей сноса материала, так как $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ и $^{40}\text{K}/^{232}\text{Th}$ отражают количество циклов седиментации и выветривания, через которые прошел материал [Курбанов и др., 2021]. В разрезе Остров Левый соотношение $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ равномерно распределено в районе 0,92, без резких отскоков, а $^{40}\text{K}/^{232}\text{Th}$ близко к 15,4, также без разброса значений, что указывает на единый источник материала при формировании отложений в районе изученного разреза.

Таблица 2

Результаты гамма-спектрометрического анализа. Содержание радиоактивных элементов в образце и скорость накопления дозы

№	Лаб. номер	Н, см	Слой в разрезе	Водонасыщение, %	^{226}Ra , Бк/кг	^{232}Th , Бк/кг	^{40}K , Бк/кг	Скорость накопления дозы для кварца Гр/тыс. лет
1	208525	40	Суглинок	10	$38,0 \pm 0,5$	$41,5 \pm 0,8$	675 ± 8	$3,24 \pm 0,17$
2	208526	100	Лессовидный суглинок	10	$38,3 \pm 0,7$	$40,8 \pm 0,6$	642 ± 12	$3,12 \pm 0,16$
3	208527	120	Лессовидный суглинок	10	$38,6 \pm 0,9$	$40,0 \pm 0,8$	608 ± 16	$3,02 \pm 0,16$
4	208528	160	Песок	5	$19,5 \pm 0,3$	$21,2 \pm 0,3$	341 ± 5	$1,81 \pm 0,10$
5	208529	250	Песок	5	$24,1 \pm 0,3$	$26,3 \pm 0,3$	404 ± 5	$2,13 \pm 0,11$
6	208530	300	Песок	5	$23,4 \pm 0,2$	$24,7 \pm 0,2$	394 ± 4	$2,05 \pm 0,11$
7	208531	360	Глины с прослоями песка	10	$41,4 \pm 0,4$	$46,6 \pm 0,3$	689 ± 6	$3,35 \pm 0,18$
8	208532	380	Песок с прослоями глины	10	$33,2 \pm 0,5$	$35,4 \pm 0,5$	451 ± 7	$2,40 \pm 0,13$
9	208533	500	Глины	25	$33,1 \pm 0,5$	$37,6 \pm 0,5$	610 ± 10	$2,47 \pm 0,11$

Результаты измерений показали доминирование быстрого компонента в люминесценции всех образцов. Кривая насыщения строилась по пяти точкам в результате облучения бета-источником фиксированной дозой (20, 40, 80, 0, 20 Гр). Дозы по кварцу оказались в пределах 60 Гр. Наиболее надежными считаются результаты по кварцу [Murray et al., 2012], они и были использованы для получения итоговой геохронологии.

Все образцы показали стабильный и отчетливый люминесцентный отклик, благодаря чему доверительный интервал полученных дат не превышает 1,7 тыс. лет. Результаты датирования представлены в табл. 3. Выполненные стандартные тесты чистоты кварца, восстановления дозы (1,03, $n = 15$) и рецир-

куляции оказались в интервалах, указывающих на высокую надежность датирования.

Результаты люминесцентного датирования с учетом доверительных интервалов указывают на наличие в разрезе трех разновозрастных горизонтов: 1) субаэральной толщи (слои 1–3) голоценового возраста ($\sim 11,5$ – $7,1$ тыс. лет); 2) толщи песков с прослоями глины в основании (слои 4–6) возрастом моложе последнего ледникового максимума ($\sim 17,7$ – $14,9$ тыс. лет); 3) темно-серо-коричневых глины возрастом $20,7 \pm 1,7$ тыс. лет. Результат датирования образца из слоя глины в основании разреза, по-видимому, несколько завышен ввиду сложности расчета мощности дозы на границах слоев, резко отличающихся по литологии.

Таблица 3

Результаты ОSL-датирования

№	Лаб. номер	Глубина, см	Слой в разрезе	Измерения по кварцу (OSL)		
				Доза, Гр	Возраст, тыс. лет	Кол-во аликовт
1	208525	40	Суглинок	$23,1 \pm 1,9$	$7,1 \pm 0,7$	19
2	208526	90	Лессовидный суглинок	$35,7 \pm 2,1$	$11,5 \pm 0,9$	18
3	208527	120	Лессовидный суглинок	$30,1 \pm 1,9$	$9,9 \pm 0,8$	18
4	208528	145	Песок	$27,0 \pm 0,8$	$14,9 \pm 0,9$	16
5	208529	250	Песок	$33,9 \pm 1,1$	$15,9 \pm 1,1$	16
6	208530	300	Песок	$37,1 \pm 0,6$	$18,1 \pm 1,1$	23
7	208531	360	Глины с прослоями песка	$57,1 \pm 1,8$	$17,1 \pm 1,1$	22
8	208532	380	Песок с прослоями глины	$42,5 \pm 1,6$	$17,7 \pm 1,2$	20
9	208533	500	Глины	$51,1 \pm 3,2$	$20,7 \pm 1,7$	23

Выделенная на основе малакофаунистического анализа толща нижнехвалынских отложений охарактеризована пятью датировками и имеет возраст ~17,7–14,9 тыс. лет. Верхняя часть разреза, включающая в себя прослой хвалынской фауны, датирована $14,9 \pm 0,9$.

Таким образом, на основании результатов ОСЛ-датирования время функционирования раннехвалынского пролива в Манычской депрессии определено в интервале 17,7–14,9 тыс. лет назад. Этот вывод находится в согласии с данными, полученными радиоуглеродным методом [Свиточ и др., 2009; Arslanov et al., 2015], и еще раз подтверждает точку зрения сторонников «молодого» возраста раннехвалынской трансгрессии Каспия. Полученные ОСЛ-даты соответствуют датировкам нижнехвалынских отложений Нижнего Поволжья, полученным этим же методом [Янина и др., 2017; Kurbanov et al., 2021]. В климатическом отношении это была эпоха деградации поздневалдайского (осташковского) оледенения (МИС 2), что подтверждается материалами палинологического анализа одновозрастных отложений Нижнего Поволжья [Болиховская, Макшаев, 2019] и проявлением в них криогенеза [Рогов и др., 2020; Taratunina et al., 2021].

Строение разреза отражает постепенную смену условий осадконакопления от спокойных лиманных (ингрессия каспийских вод) до динамичных проточных (развитие и активизация пролива). Верхняя часть толщи нижнехвалынских отложений, которая характеризуется косослоистыми, хорошо сортированными среднезернистыми песками с включением фауны каспийских моллюсков, отражает повышение уровня пролива (до 21 м над современным уровнем моря) и увеличение скорости водного потока. Малакофаунистический состав отложений свидетельствует о несколько пониженной

(по сравнению с раннехвалынским бассейном) солености пролива (около 10–11‰), что объясняется опресняющим влиянием местных водотоков. Субаэральное осадконакопление активизировалось на территории центральной части Манычской депрессии в начале голоцена.

ВЫВОДЫ

Возраст раннехвалынского пролива в Манычской депрессии определен в интервале 18–14 тыс. лет назад на основании датирования его отложений методом оптически стимулированной люминесценции.

Установленный возрастной интервал находится в согласии с результатами датирования нижнехвалынских отложений Маныча радиоуглеродным методом и соответствует оценке одновозрастных осадков Нижнего Поволжья.

Время функционирования раннехвалынского пролива отвечает эпохе деградации последнего (поздневалдайского, осташковского) оледенения (МИС 2).

Пролив характеризовался условиями среды от лиманных (ингрессия каспийских вод) до динамичных проточных (развитие и активизация пролива); соленость вод оценивается в 10–11‰.

Субаэральное осадконакопление на территории центральной части Манычской депрессии началось в начале голоцена.

Первый опыт датирования верхнеплейстоценовых отложений Манычской депрессии методом оптически стимулированной люминесценции показал его перспективность для создания геохронологической схемы отложений и событий региона, их корреляции с глобальными и региональными изменениями климата, с палеогеографическими событиями в Понто-Каспийской области и на Восточно-Европейской равнине.

Благодарности. Экспедиционные исследования выполнены в 2020 г. по программе госзадания ИГ РАН АААА-А19-119021990091-4 (FMGE-2019-0005), малакофаунистический анализ поддержан госзадаaniem МГУ имени М.В. Ломоносова (121051100135-0), люминесцентное датирование выполнено при поддержке РНФ (21-18-00552).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бадюкова Е.Н. Некоторые вопросы истории развития Маныча в позднем плейстоцене-голоцене // Человечество и береговая зона Мирового океана в XXI веке. М.: Геос, 2011. С. 326–333.
- Болиховская Н.С., Макшаев Р.Р. Раннехвалынский этап развития Каспия: палинофлора и климато-фитоцено-тические реконструкции. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 3. С. 57–71.
- Богачев В.В. Степи бассейна р. Маныч // Известия Гео-логического комитета. 1903. Т. 22. № 9. С. 73–162.
- Горецкий Г.И. О палеогеографии Приазовья и Западного Приманьчья в узунларо-гирканский и буртасские века // Вопросы географии. 1953. № 33. С. 190–221.
- Курбанов Р.Н., Янина Т.А., Мюррей А.С., Семиколенных Д.В., Свистунов М.И., Штыркова Е.И. Возраст Карангатской трансгрессии (поздний плейстоцен) Черного моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 6. С. 29–39.

- Курбанов Р.Н., Ульянов В.А., Анойкин А.А., Павленок Г.Д., Семиколенных Д.В., Харевич В.М., Таймагамбетов Ж.К., Мюррей Э.Ш. Первая люминесцентная хронология начального верхнего палеолита Восточного Казахстана (по материалам стоянки Ушбулак) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 5. С. 131–148.
- Попов Г.И. Плейстоцен Черноморско-Каспийских проливов. М.: Наука, 1983. 214 с.
- Рычагов Г.И. Хвалынский этап в истории каспийского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2014. № 4. С. 3–9.
- Рогов В.В., Стрелецкая И.Д., Таратунина Н.А., Курчатова А.Н., Курбанов Р.Н., Янина Т.А. Позднеплейстоценовый криогенез в Нижнем Поволжье // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 6. С. 73–85.
- Свиточ А.А., Парунин О.Б. Радиоуглеродный возраст палеогеографических событий позднего плейстоцена голоцена Северного Прикаспия // Доклады Академии наук. М.: Наука, 2000. Т. 371. № 4. С. 535–535.
- Свиточ А.А., Янина Т.А. Новые данные по малакофауне морского плейстоцена Маныча // Доклады Академии наук. М.: Наука, 2001. Т. 380. № 4. С. 570–573.
- Свиточ А.А., Янина Т.А., Антонова В.М., Плихт ван дер Й. Хвалынская фауна Маныча // Доклады РАН. Серия геогр. 2008. Т. 421. № 5. С. 987–992.
- Свиточ А.А., Хоменко А.А. Грядовый рельеф Маныча (строение и происхождение) // Геоморфология. 2009. № 4. С. 99–108.
- Свиточ А.А., Янина Т.А., Хоменко А.А., Новикова Н.Г. Хвалынские отложения Маныча // Доклады Академии наук. Серия геогр. 2009. Т. 428. № 1. С. 70–74.
- Свиточ А.А., Янина Т.А., Новикова Н.Г., Соболев В.М., Хоменко А.А. Плейстоцен Маныча (вопрос строения и развития). М.: Россельхозакадемия, 2010. 135 с.
- Свиточ А.А., Новикова Н.Г., Березнер О.С., Седаева К.М. Литология и фации бургасских и хвалынских отложений Маныча // Литология и полезные ископаемые. 2011. № 4. С. 428–438.
- Свиточ А.А., Макишев Р.Р. Взаимосвязи палеогеографических событий в Понт-Маныч-Каспийской системе в позднем плейстоцене-голоцене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 2. С. 24–32.
- Федоров П.В. Плейстоцен Понто-Каспия. М.: Наука, 1978. 165 с.
- Чепалыга А.Л., Пирогов А.Н., Садчикова Т.А. Сброс каспийских вод хвалынского бассейна по Манычской долине в эпоху экстремальных затоплений (Всемирный потоп) // Проблемы палеонтологии и археологии юга России и сопредельных территорий. Ростов на/Д.: ЦВВР, 2005. 138 с.
- Янина Т.А. Бассейны Понто-Каспия в плейстоцене (палеогеографический анализ моллюсков рода *Didacna* Eichwald) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2006. № 3. С. 32–39.
- Янина Т.А. Неоплейстоцен Понто-Каспия: биостратиграфия, палеогеография, корреляция. М.: МГУ, 2012. 264 с.
- Янина Т.А., Свиточ А.А., Курбанов Р.Н., Мюррей А.С., Ткач Н.Т., Сычев Н.В. Опыт датирования плейстоценовых отложений Нижнего Поволжья методом оптически стимулированной люминесценции // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 1. С. 20–28.
- Arslanov Kh.A., Yanina T.A. Radiocarbon age of the Khvalynian Manych passage, Black Sea – Mediterranean corridor during the last 30 ky: sea level change and human adaptation, Bukharest, EcoGeoMar, 2008, p. 10–13.
- Arslanov K.A., Yanina T.A., Chepalyga A.L., Svitoch A.A., Makshaev R.R., Maksimov F.E., Chernov S.B., Tertychniy N.I., Starikova A.A. On the age of the Khvalynian deposits of the Caspian Sea coasts according to ^{14}C and $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ methods, *Quaternary International*, 2015, no. 409, p. 81–87.
- Chepalyga A., Arslanov Kh., Yanina T. Detailed age control of the Khvalynian basin history, *Black Sea – Mediterranean corridor during the last 30 ky: sea level change and human adaptation*, Istanbul, 2009, p. 23–26.
- Kurbanov R.N., Murray A.S., Thompson W., Svistunov M.I., Taratunina N.A., Yanina T.A. First reliable chronology for the Early Khvalynian Caspian Sea transgression in the Lower Volga River valley, *Boreas*, 2021, vol. 50, p. 134–146.
- Mamedov A.V. The Late Pleistocene-Holocene history of the Caspian Sea, *Quaternary International*, 1997, no. 41–42(96), p. 161–166.
- Murray A., Marten R., Johnston A., Martin P. Analysis for naturally occurring radionuclides at environmental concentrations by gamma spectrometry, *J. of Radioanal. and Nucl. Chem*, 1987, no. 115, p. 263–288.
- Murray A.S., Wintle A.G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol, *Radiat. Meas.*, 2000, no. 1(32), p. 57–73.
- Murray A.S., Wintle A.G. The single aliquot regenerative dose protocol: Potential for improvements in reliability, *Radiation Measurements*, 2003, no. 37, p. 377–381.
- Murray A.S., Thomsen K.J., Masuda N., Buylaert J.P., Jain M. Identifying well-bleached quartz using the different bleaching rates of quartz and feldspar luminescence signals, *Radiation Measurements*, 2012, no. 9(47), p. 688–695.
- Taratunina N., Rogov V., Streletskaia I., Thompson W., Kurchatova A., Yanina T., Kurbanov R. Late Pleistocene cryogenesis features of a loess-paleosol sequence in the Srednyaya Akhtuba reference section, Lower Volga River valley, Russia, *Quaternary International*, 2021, vol. 590, p. 56–72.
- Thom N. A hydrological model of the Black and Caspian Seas in the late Pleistocene and early-middle Holocene, *Quaternary Science Reviews*, 2010, no. 29(23–24), p. 2989–2995.

Поступила в редакцию 20.06.2021

После доработки 15.11.2021

Принята к публикации 09.03.2022

DATING THE KHALYNYN STRAIT WITHIN THE LATE PLEISTOCENE HISTORY OF THE MANYCH DEPRESSION

D.V. Semikolennykh¹, R.N. Kurbanov², T.A. Yanina³

¹ Institute of Geography of Russian Academy of Science, Department of Quaternary paleogeography

^{2,3} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography

² Institute of Archaeology and Ethnography, Siberian Branch, RAS

¹ Postgraduate student; e-mail: aristova@igras.ru

² Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: kurbanov@igras.ru

³ Head of the Laboratory, D.Sc. in Geography; e-mail: paleo@inbox.ru

At the end of the Late Pleistocene the Early Khvalynian transgression with maximum level of 45–50 m was progressing in the Caspian basin. As soon as its waters exceeded the height of the watershed with the Azov-Black Sea basin the Early Khvalynian Strait was opened, mainly through the Manych Depression – a vast low area in the south of the European Russia. Despite the long investigation history of the region, the opinions of researchers regarding the age of the deposits of the Early Khvalynian Strait differ. Until now the time period of the strait existence was not unambiguously correlated with the global chronostratigraphic scheme. The article presents the results of optically stimulated luminescence (OSL) dating of the Lower Khvalynian deposits exposed in the coastal outcrop of the western tip of the Levyi Island in the central part of the Manych Depression. In total, nine dates were obtained: six of them characterize the aquatic stages of the territory evolution, and three are for the subaerial ones. Biostratigraphic analysis of the mollusc fauna confirmed that marine sediments exposed in the section of the Levyi Island belong to the Early Khvalynian transgression of the Caspian Sea. Based on the dating results, the time when the Early Khvalynian waters penetrated into the Manych Depression was determined at 17,7–14,9 thousand years ago, thus corresponding to the epoch of degradation of the Late Valdai ice sheet (the Ostashkov stage, MIS 2). The subaerial sedimentation in the central part of the Manych Depression started at the beginning of the Holocene.

Keywords: Late Pleistocene, Early Khvalynian transgression, OSL dating, malacofauna, Caspian Sea

Acknowledgements. Field studies were carried out in 2020 under the program of the state assignment of the IG RAS AAAA-A19-119021990091-4 (FMGE-2019-0005); the malacofaunistic analysis was financially supported by the state assignment of the Lomonosov Moscow State University (121051100135-0); luminescence dating was financially supported by the Russian Science Foundation (project 21-18-00552).

REFERENCES

- Arslanov Kh.A., Yanina T.A. Radiocarbon age of the Khvalynian Manych passage, *Black Sea – Mediterranean corridor during the last 30 ky: sea level change and human adaptation*, Bukharest, EcoGeoMar Publ., 2008, p. 10–13.
- Arslanov K.A., Yanina T.A., Chepalyga A.L., Svitoch A.A., Makshaev R.R., Maksimov F.E., Chernov S.B., Tertychniy N.I., Starikova A.A. On the age of the Khvalynian deposits of the Caspian Sea coasts according to ¹⁴C and ²³⁰Th/²³⁴U methods, *Quaternary International*, 2015, no. 409, p. 81–87.
- Badyukova E.N. [Some questions about history of Manych development in the Late Pleistocene-Holocene], *Chelovechestvo i beregovaya zona Mirovogo okeana v XXI veke* [Humanity and the coastal zone of the World Ocean in the 21st century], Moscow, GEOS Publ., 2011, p. 326–333. (In Russian)
- Bogachev V.V. Stepi basseina r. Manych [Steppes of the Manych river basin], *Izveskiya Geologicheskogo komiteta*, 1903, no. 9(22), p. 73–162. (In Russian)
- Bolikhovskaya N.S., Makshaev R.R. Rannekhvalynskii etap razvitiya Kaspiya: palinoflora i klimato-fitotsenoticheskie rekonstruktsii [The Early Khvalynian stage of the Caspian Sea evolution: palynoflora and climatic-phyto-
- coenotic reconstructions], *Vestn. MGU, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 3, p. 57–71. (In Russian)
- Chepalyga A.L., Pirogov A.N., Sadchikova T.A. [The release of Caspian waters of the Khvalynian basin by the Manych valley during the extreme floods epoch (the Deluge)], *Problemy paleontologii i arheologii uga Rossii i sopredel'nykh territorii* [The problems of paleontology and archaeology of the Russian South and adjacent territory], Rostov-na-Dony, CVVP Publ., 2005, p. 50–53. (In Russian)
- Chepalyga A., Arslanov Kh., Yanina T. Detailed age control of the Khvalynian basin history, *Black Sea – Mediterranean corridor during the last 30 ky: sea level change and human adaptation*, Istanbul, 2009, p. 23–26.
- Fedorov P.V. *Pleystocen Ponto-Kaspiya* [The Ponto-Caspian Pleistocene], Moscow, Nauka Publ., 1978, 165 p. (In Russian)
- Goreckiy G.I. O paleogeografii Priazov'ya i Zapadnogo Primanych'ya v uzunlarsko-girkanskij i burtasskie veka [About paleogeography of Priazov and Western Manych regions during Uzunlar – Girkanian and Burtass epochs], *Vopr. Geografii*, 1953, vol. 33, p. 190–221. (In Russian)
- Kurbanov R.N., Yanina T.A., Murray A.S., Semikolennykh D.V., Svistunov M.I., Shtyrkova E.I. Vozrast Ka-

- rangatskoy transgressii (pozdniy pleystotsen) Chornogo morya [The age of the Karangatian (Late Pleistocene) transgression of the Black Sea], *Vestn. MGU, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 6, p. 29–39. (In Russian)
- Kurbanov R.N., Murray A.S., Thompson W., Svistunov M.I., Taratunina N.A., Yanina T.A. First reliable chronology for the Early Khvalynian Caspian Sea transgression in the Lower Volga River valley, *Boreas*, 2021, vol. 50, p. 134–146.
- Kurbanov R.N., Ulyanov V.A., Anoykin A.A., Pavlenok G.D., Semikolennykh D.V., Kharevich V.M., Taimagambetov Zh.K., Murray A.S. Pervaya luminestsentnaya khronologiya nfchalnogo verkhnego paleolita Vostochnogo Kazakhstana (po materialam stoyanki Ushbulak) [The first luminescence chronology of the initial Upper Paleolithic of East Kazakhstan (based on materials from the Ushbulak site)], *Vestn. MGU, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 5, p. 131–148. (In Russian)
- Mamedov A.V. The Late Pleistocene-Holocene history of the Caspian Sea, *Quaternary International*, 1997, no. 41–42(96), p. 161–166.
- Murray A., Marten R., Johnston A., Martin P. Analysis for naturally occurring radionuclides at environmental concentrations by gamma spectrometry, *J. of Radioanal. and Nucl. Chem.*, 1987, no. 115, p. 263–288.
- Murray A.S., Wintle A.G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol, *Radiat. Meas.*, 2000, no. 1(32), p. 57–73.
- Murray A.S., Wintle A.G. The single aliquot regenerative dose protocol: Potential for improvements in reliability, *Radiation Measurements*, 2003, no. 37, p. 377–381.
- Murray A.S., Thomsen K.J., Masuda N., Buylaert J.P., Jain M. Identifying well-bleached quartz using the different bleaching rates of quartz and feldspar luminescence signals, *Radiation Measurements*, 2012, no. 9(47), p. 688–695.
- Popov G.I. *Plejstocen Chernomorsko-Kaspijskikh prolivov* [Pleistocene of the Black Sea and Caspian Sea passages], Moscow, Nauka Publ., 1983, 216 p. (In Russian)
- Rogov V.V., Streletskaya I.D., Taratunina N.A., Kurchatova A.N., Kurbanov R.N., Yanina T.A. Pozdnepleistotsenovii kriogenez v Nizhnem Povolzh'e [Late Pleistocene cryogenesis in the Lower Volga River region], *Vestn. MGU, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 6, p. 73–85. (In Russian)
- Rychagov G.I. Khvalynsky etap v istorii Kaspijskogo moray [Knavynian stage in the history of the Caspian Sea], *Geomorphology*, 2014, no. 4, p. 3–9. (In Russian)
- Svitoch A.A., Parunin O.B. Carbon-14 dating of Late Pleistocene-Holocene Paleogeographic Events in the North Caspian region, *Doklady Earth Sciences*, 2000, no. 4 (371), p. 448–450.
- Svitoch A.A., Yanina T.A. New data on the mollusk fauna from the Marine Pleistocene of Manych, *Doklady Biological Sciences*, 2001, no. 1–6(380), p. 478–481.
- Svitoch A.A., Khomenko A.A. Gryadovy rel'ef Manycha (stroenie i proiskhozhdenie) [Ridge relief of Manych (structure and origin)], *Geomorfologiya*, 2009, no. 4, p. 99–108. (In Russian)
- Svitoch A.A., Yanina T.A., Novikova N.G., Sobolev V.M., Homenko A.A. *Plejstocen Manycha (voprosy stroeniya i razvitiya)* [Pleistocene of the Manych (questions about structure and development)], Moscow, Rossel'hozakademiya, 2010, 135 p. (In Russian)
- Svitoch A.A., Novikova N.G., Berezner O.S., Sedaeva K.M. Litologiya i fatsii burtasskikh i khvalynskikh otlogeni Manycha [Lithology and facies of the Burtassian and Khvalynian deposits of Manych], *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 2011, no. 4, p. 428–438. (In Russian)
- Svitoch A., Yanina T., Antonova M., Plicht van der I. The Khvalynian fauna of the Manych depression, *Doklady Earth Sciences*, 2008, no. 2 (421), p. 987–991.
- Svitoch A.A., Makshaev R.R. Vzaimosvyazi paleogeograficheskikh sobytij v Pont-Manych-Kaspijskoj sisteme v pozdnem Pleistocene-Golocene [Interrelations of the paleogeographical events in the Pont-Manych-Caspian system during the Late Pleistocene and Holocene], *Vestn. MGU, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 2, p. 24–32. (In Russian)
- Svitoch A.A., Yanina T.A., Khomenko A.A., Novikova N.G. Khvalynskie otlogeniya Manychskoi depressii [Khvalynian sediments of the Manych Depression], *Doklady Akademii nauk*, no. 1 (428), p. 70–74. (In Russian)
- Taratunina N., Rogov V., Streletskaya I., Thompson W., Kurchatova A., Yanina T., Kurbanov R. Late Pleistocene cryogenesis features of a loess-paleosol sequence in the Srednyaya Akhtuba reference section, Lower Volga River valley, Russia, *Quaternary International*, 2021, vol. 590, p. 56–72.
- Thom N. A hydrological model of the Black and Caspian Seas in the late Pleistocene and early-middle Holocene, *Quaternary Science Reviews*, 2010, no. 29(23–24), p. 2989–2995.
- Yanina T.A. Basseiny Ponto-Kaspiya v pleistotsene (paleogeograficheskii analiz molluskov roda Didacna Eichwald) [The Ponto-Caspian basins in the Pleistocene (paleogeographical analysis of mollusks of the genus Didacna Eichwald)], *Vestn. MGU, Ser. 5, Geogr.*, 2006, no. 3, p. 32–39. (In Russian)
- Yanina T.A. *Neoplejstocen Ponto-Kaspiya: biostratigrafiya, paleogeografiya, korrelyatsiya* [Neo-Pleistocene of the Ponto-Caspian: biostratigraphy, paleogeography, correlation], Moscow, MGU, 2012, 264 p. (In Russian)
- Yanina T.A., Svitoch A.A., Kurbanov R.N., Murray A.S., Tkach N.T., Sychev N.Y. Opyt datirovaniya pleistotsenovykh otlogeni Nizhnego Povolg'ya metodom opticheskii stimulirovannoi luminestsentsii [Paleogeographic analysis of the results of optically stimulated luminescence dating of Pleistocene deposits of the Lower Volga area], *Vestn. MGU, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 1, p. 20–28. (In Russian)

Received 20.06.2021

Revised 15.11.2021

Accepted 09.03.2022

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ ЛЕДОВИТОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

С.Б. Крашенинникова¹, И.Г. Шокурова², А.Н. Демидов³

¹ ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского» РАН, отдел функционирования морских экосистем, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: svetlanabk@mail.ru

² Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт» РАН, отдел океанографии, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: igshokurova@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: alik1@mail.ru

Выявлены особенности пространственного распределения скорости поверхностных течений и температуры Северной Атлантики с использованием океанического реанализа ORA-S4 в условиях изменяющейся ледовитости Баренцева моря, оцененной по данным инструментальных наблюдений за 1958–2014 гг. На основе анализа полей пространственного распределения коэффициентов прямых корреляций и со сдвигом в один год между указанными параметрами установлены районы со значимыми связями. Наибольшие коэффициенты корреляции ледовитости в Баренцевом море получены для районов северных границ Гольфстрима и Южного пассатного течения, а также Трансарктического течения. Коэффициент корреляции среднегодовых значений температуры в Баренцевом море с температурой и скоростью течений в Гольфстриме составляет 0,86 и 0,75 соответственно. Увеличение ледовитости происходит при усилении скорости Трансарктического течения. Корреляция между температурой Баренцева моря и скоростью этого течения к северо-западу от арх. Шпицберген составляет –0,72. Скорость в районах северных границ Гольфстрима и Южного пассатного течения, температура в Гольфстриме и Баренцевом море имеют положительные тренды в межгодовой изменчивости, а скорость в Трансарктическом течении и ледовитость Баренцева моря – отрицательные.

Ключевые слова: морской лед, скорости течений, ТПО, многолетняя изменчивость, Северо-Европейский бассейн

ВВЕДЕНИЕ

Арктика представляет стратегический интерес для России как нефтегазовый, промысловый и транспортный регион. Поэтому его изучение является одной из приоритетных задач последних десятилетий [Алексеев и др., 2017; Жичкин, 2015; Матишов, Дженюк, 2012]. Мониторинг ледовитости Арктики ведется уже более 100 лет и позволяет дать сравнительно точную оценку низкочастотной изменчивости количества льда.

Многолетние исследования показывают, что приповерхностная температура воды в Арктическом регионе растет в два раза быстрее, чем в других районах Мирового океана [Cohen et al., 2014]. Площадь ледового покрова в Арктике летом и зимой постоянно сокращается, что заметно проявляется в Баренцевом море [Onarheim, Årthun, 2017; Buettner et al., 2020]. Ледовитость в Баренцевом море за период спутниковых наблюдений с 1979 г. сократилась зимой до одной трети от начального значения и достигла своего минимального значения за весь многовековой период наблюдений [Onarheim, Årthun, 2017]. За счет уменьшения площади ледяного покрова в Арктике происходит из-

менение поверхностного теплового баланса. Оно выражается в увеличении поглощенной солнечной радиации в результате уменьшения альбедо и увеличения турбулентного тепло-влагообмена [Serreze, Barry, 2011]. Такая перестройка теплового баланса влечет за собой изменение теплосодержания нижних слоев атмосферы, что сказывается на режиме облачности и атмосферной циркуляции.

Из-за значительных вариаций ледовитости в сочетании с высокой для данных широт температурой морской поверхности Баренцево море в последние годы принято считать одной из энергоактивных зон Мирового океана, а изменчивость его ледовитости можно рассматривать в качестве важного индикатора климатических изменений.

Причины изменений площади ледяного покрова до сих пор являются предметом дискуссии [Serreze, Barry, 2011]. Уменьшение площади льда в Арктике чаще всего связывают с влиянием атмосферной циркуляции [Dahlke, Maturilli, 2017; Hall et al., 2020]. В работе [Dahlke, Maturilli, 2017] показано, что около четверти наблюдаемых тенденций зимнего приповерхностного потепления в Северо-Европейском бассейне обусловлены увеличением адвек-

ции теплого и влажного воздуха из низких широт Северной Атлантики.

На связь изменений ледовой обстановки в арктическом регионе и термических условий в тропиках через атмосферную циркуляцию и, в частности, через атмосферные волны Россби указывается в работах [Hall et al., 2020; McCrystall et al., 2020]. Обнаружены также связи изменчивости ледовитости в Арктике с глобальными климатическими сигналами – Североатлантическим колебанием и Атлантической мультideкадной осцилляцией [Крашенинникова, Крашенинникова, 2019; Семенов и др., 2017]. На основе расчетов атмосферных потоков явного и скрытого тепла в районе 70° с. ш. в зимний период показано, что среднее многолетнее термодинамическое состояние Баренцева моря существенно определяется меридиональным переносом тепла из Атлантики

[Алексеев и др., 2017]. В период спутниковых наблюдений (1981–2018) летние аномалии температуры атлантических вод, поступающих в Арктику, объясняют более 80% дисперсии изменчивости первой моды сплоченности морского льда в последующем зимнем сезоне [Schlichtholz, 2019]. В связи с этим актуальной является задача анализа изменчивости скорости течений в Северной Атлантике, переносящих теплую воду из низких в высокие широты и расчеты количественных оценок связей между этими изменениями, площадью ледового покрова в Арктике и, в частности, ледовитостью в Баренцевом море.

Цель работы – выявление особенностей в полях скоростей течений и температуры в поверхностном слое Северной Атлантики и Северо-Европейского бассейна, проявляющихся при изменениях ледовитости в Баренцевом море.

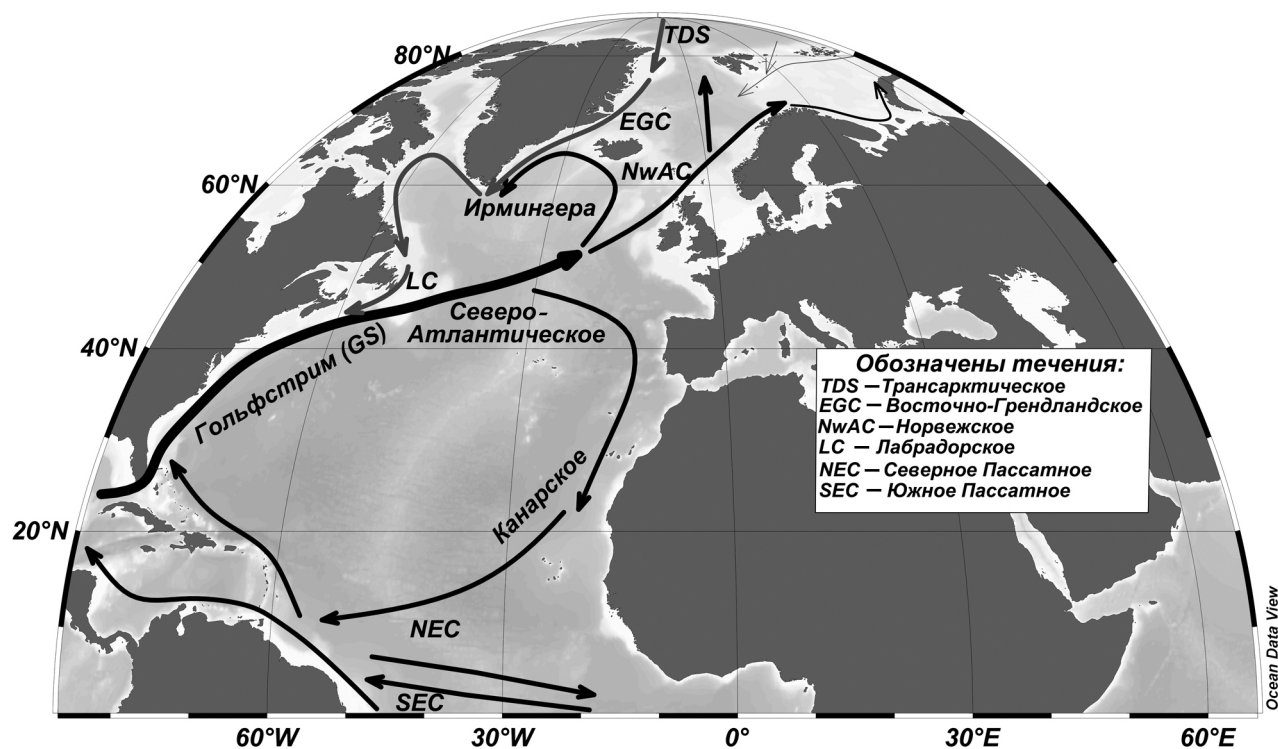


Рис. 1. Общая схема циркуляции в районе исследования

Fig. 1. General circulation scheme within the study area

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использовались среднемесячные значения потенциальной температуры на глубине 5 м θ (°C) и скорости поверхностных течений u , v (м/с) океанического реанализа ORA-S4 [Balmaseda et al., 2013] с пространственным разрешением ($1 \times 1^\circ$) за 1958–2017 гг. в районе 0–89° с. ш., 85° з. д. – 60° в. д.

Использование океанического реанализа ORA-S4 обусловлено тем, что он достаточно хорошо описывает поверхностные скорости течений и температуру в Северной Атлантике на межгодовых и междесятилетних масштабах [Krashennikova et al., 2020, 2021].

Были привлечены среднегодовые натурные данные по ледовитости Баренцева моря за 1958–

2014 гг., собранные по работам [Воробьев и др., 2010; Жичкин, 2015; Матишов, Дженюк, 2012].

В работе рассматривается регион, включающий в себя Северную Атлантику и ряд морей Северо-Европейского бассейна: Гренландское, Норвежское, Баренцево (рис. 1).

Для анализа связей между вариациями ледовых условий в Баренцевом море и изменчивостью поверхностной циркуляции в исследуемом регионе вычислялись коэффициенты корреляции между временным рядом ледовитости и рядами температуры поверхностного слоя океана и скорости течений. Рассчитывались прямые корреляции (r) между ледовитостью и январскими значениями скорости течений и температуры, и сдвиговые корреляции (r_{-1}) с рядами среднегодовых значений за предыдущий год.

Для анализа межгодовой изменчивости изучаемых параметров были выделены районы с высокими значениями корреляции между изменчивостью ледовитости в Баренцевом море, скоростью течений и температурой в Северной Атлантике и Северо-Европейском бассейне: А – район северной границы Гольфстрима ($41\text{--}42^\circ$ с. ш., $56\text{--}59^\circ$ з. д.), В – Трансарктическое течение ($75\text{--}77^\circ$ с. ш., $3\text{--}7^\circ$ з. д.), С – район северной границы Южного пассатного течения ($0\text{--}3^\circ$ с. ш., $16\text{--}32^\circ$ з. д.), D – стрежень Гольфстрима ($38\text{--}42^\circ$ с. ш., $52\text{--}62^\circ$ з. д.), Е – Баренцево море ($70\text{--}75^\circ$ с. ш., $40\text{--}45^\circ$ з. д.).

В выделенных районах анализировались долговременные тенденции изменений температуры и скорости течений. Для районов А, В, С, D проводилось сравнение полей скорости течений в периоды с наибольшими (1966–1969, 1978–1982) и наименьшими (2000–2002, 2004–2007) значениями ледовитости.

Значимость линейных трендов временных рядов и коэффициентов корреляции определялась на основе t -критериев Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственное распределение коэффициентов корреляции. На рис. 2 представлено пространственное распределение положительных (см. рис. 2А) и отрицательных значений (см. рис. 2Б) коэффициентов корреляции между среднегодовой ледовитостью в Баренцевом море и модулем скорости течений в каждом узле сетки за предшествующий год. Положительная связь скоростей течений с ледовитостью ($r = 0,5 \dots 0,62$) получена на южной границе зонального участка Гольфстрима и в Трансарктическом течении (см. рис. 2А). Кроме того, положительные значения корреляции скорости Гольфстрима с ледовитостью находятся на восточной границе Гольфстрима в районе $30\text{--}35^\circ$ с. ш. При увеличении скоростей течений в этих районах ледо-

витость в Баренцевом море возрастала. Отрицательная связь изменчивости ледовитости в Баренцевом море со скоростью течений ($r = -0,64 \dots -0,5$) получена в районах северной границы Гольфстрима, Северо-Атлантического течения, Восточно-Гренландского течения, а также части Южного пассатного течения, находящейся в Северном полушарии (см. рис. 2Б). При усилении этих течений в указанных районах ледовитость уменьшалась.

В Гольфстриме участок с отрицательными значениями корреляции расположен на северной границе потока (см. рис. 2А, В, район А), с положительными – на южной границе, что может свидетельствовать о меридиональных смещениях течения, аналогичных смещениям в районе Северной стены Гольфстрима [Krashenninnikova et al., 2020].

В проливе Фрама отрицательные коэффициенты корреляции наблюдаются в районе Восточно-Гренландского течения, а положительные – в восточной части пролива, ближе к арх. Шпицберген (район В), а также вдоль северной границы Баренцева моря. Так как Восточно-Гренландское течение является продолжением Трансарктического течения, то такое пространственное распределение значений коэффициентов корреляции можно интерпретировать следующим образом: увеличение ледовитости происходит при усилении Трансарктического течения в восточной части пролива и вдоль северной границы Баренцева моря и ослаблении Восточно-Гренландского течения вблизи берега Гренландии (см. рис. 2А, Г).

Наиболее высокие значения коэффициента корреляции находятся в экваториальном районе (район С). Усиление скорости в районе северной границы Южного пассатного течения предшествует ослаблению ледовитости в Баренцевом море (см. рис. 2Б, Д).

Для января при расчете корреляции без сдвига отрицательная связь скорости течений в Северной Атлантике с ледовитостью Баренцева моря, кроме указанных районов, получена для района Норвежского течения.

Пространственное распределение положительных значений коэффициента корреляции между ледовитостью в Баренцевом море и потенциальной температурой в поверхностном слое со сдвигом на один предшествующий год представлено на рис. 3А, отрицательных значений – на рис. 3Б.

Области с положительными коэффициентами корреляции расположены в Арктическом бассейне. Высокие отрицательные значения коэффициентов корреляции находятся в стречне Гольфстрима (район D), в Норвежском течении и в Баренцевом море (район Е) (см. рис. 3). Ледовитость уменьшается при повышении температуры в этих районах за счет переноса более теплой воды из низких широт в высокие. В январе наблюдается аналогичное распределение коэффициентов корреляции.

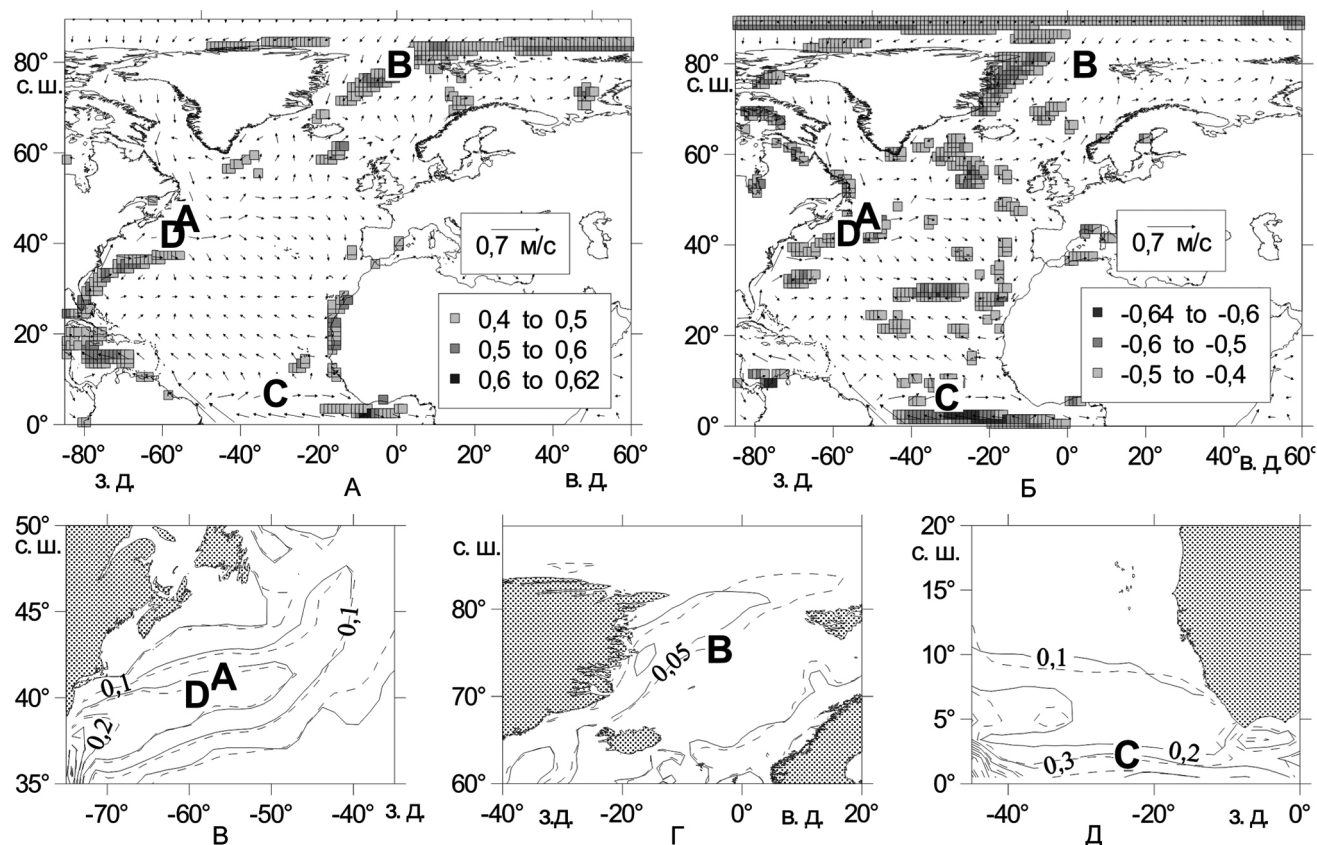


Рис. 2. Пространственное распределение положительных (А) и отрицательных (Б) значений коэффициентов корреляции между временными рядами среднегодовой ледовитости Баренцева моря и среднегодовых значений модуля скорости течений со сдвигом на предыдущий год:
 стрелки – среднемноголетнее поле скорости за 1958–2017 гг., м/с; изолинии модуля скорости течений (В–Д) в периоды с наибольшими (1966–1969, 1978–1982 гг., пунктирная линия) и наименьшими (2000–2002, 2004–2007 гг., сплошная линия и значения скорости) значениями ледовитости, м/с; А, В, С, D – выделенные районы с максимальными значениями корреляций

Fig. 2. Spatial distribution of positive (A) and negative (B) values of correlation coefficients between time series of the average annual ice extent in the Barents Sea and the average annual values of current velocity module (with a shift to the previous year):
 arrows – mean long-term velocity field m/s for 1958–2017; isolines of the modulus of current velocity (m/s) (B–D) for the periods of the highest (1966–1969, 1978–1982 – dotted line), and the smallest (2000–2002, 2004–2007 – solid line and velocity values) ice extent;
 A, B, C, D are the areas with the maximum values of correlation

В таблице приведены средние значения коэффициентов корреляции, полученные на основании прямого и сдвигового корреляционных анализов рядов характеристик для пяти выбранных районов (см. рис. 2, 3). Связи межгодовой изменчивости ледовитости со скоростью течений за предыдущий год в районах северных границ Гольфстрима ($r = -0,57$, район А) и Южного пассатного течения ($r = -0,60$, район С) оказались более высокими, чем связи с январскими значениями (см. табл.). Также были рассчитаны коэффициенты корреляции со сдвигом до 7 лет. Однако более значимых корреляционных связей со сдвигом более 1 года выявить не удалось. Значимые связи с запаздыванием от 9 до 58 месяцев климатических характеристик в Баренцевом море с аномалиями температуры в районе Ньюфаундленда и в тропической части Атлантики ранее были получены в работе [Алексеев и др., 2016].

Коэффициент корреляции среднегодовых значений температуры в Баренцевом море (район Е) с температурой в Гольфстриме (район D) составляет 0,86, а со скоростью течений на северной границе Гольфстрима (район А) – 0,75 (см. табл.).

Межгодовая изменчивость температуры и скорости течений. На рис. 4 представлена межгодовая изменчивость ледовитости в Баренцевом море и скорости течений в районах А–С, а также температуры поверхности в районах D–Е, соответственно, и их линейные тренды.

Линейные тренды, выделенные на 1% уровне значимости (см. рис. 4), демонстрируют уменьшение средней ледовитости Баренцева моря на 30% (см. рис. 4А), увеличение температуры в Гольфстриме (район D) в среднем на 2°C и в районе Баренцева моря (район Е) на $1,5^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 4В) за 1958–2017 гг. Скорость в стрежне Гольфстрима

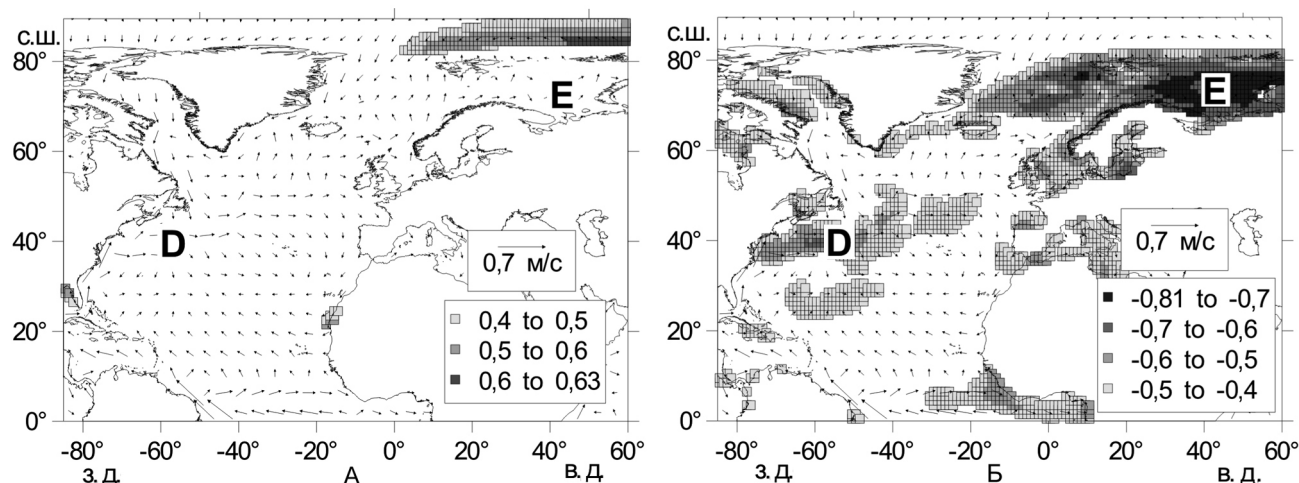


Рис. 3. Пространственное распределение положительных (А) и отрицательных (Б) значений коэффициентов корреляции между временными рядами среднегодовой ледовитости Баренцева моря и среднегодовыми значениями q на глубине 5 м со сдвигом на предыдущий год: стрелки – среднемноголетнее распределение поля скорости течений за 1958–2017 гг., м/с; D, E – выделенные районы с максимальными значениями корреляций

Fig. 3. Spatial distribution of positive (A) and negative (B) values of correlation coefficients between time series of the mean annual ice cover in the Barents Sea and the mean annual SST values (with a shift to the previous year): arrows – mean long-term current velocity field (m/s) for 1958–2017; D, E – highlighted areas with maximum correlation values

Таблица

Средние значения коэффициентов прямой (r) и сдвиговой (r_{-1})* корреляций между временными рядами ледовитости (Ice) в Баренцевом море, температурой (θ), модулем (V) и зональной компонентой (u) скорости течений в районах А–Е

Скорость течения		Ice	u_A	V_B	u_C	θ_D	θ_E
	Ice	1	-0,55; -0,57*	0,57	0,60*; -0,64	-0,70*; -0,77	-0,77
	u_A	-0,55; -0,57*	1	-0,71; -0,69*	-0,62; -0,57*	0,81	0,75; 0,66*
	V_B	0,57	-0,71; -0,69*	1	0,69; 0,68*	-0,69; -0,68*	-0,72
	u_C	0,57; 0,60*	-0,62; -0,57*	0,69; 0,68*	1	-0,71; -0,71*	-0,72; -0,65*
Температура	θ_D	-0,64; -0,70*	0,81	-0,69; -0,68*	-0,71; -0,71*	1	0,86; 0,77*
	θ_E	-0,77	0,75; 0,66*	-0,72	-0,72; -0,65*	0,86; 0,77*	1

(район D) увеличилась на 0,02 м/с, а на его северной границе (район А) на 0,04 м/с. Скорость в районе северной границы Южного пассатного течения (район С) увеличилась на 0,1 м/с (см. рис. 4Б). Скорость Трансарктического течения в районе В уменьшилась на 0,03 м/с (см. рис. 4А). Направления и значения линейных трендов совпадают с аналогичными оценками ледовитости в Баренцевом море и температуры в районе Гольфстрима, полученными в работах [Taboada, Anadón, 2012; Leifer et al., 2018; Onarheim, Årthun, 2017; Buettner et al., 2020].

Отрицательный тренд изменения скорости Трансарктического течения (район В), приносящего холодную воду из Арктики, сопровождается положительным трендом температуры в Баренцевом море (район Е) (см. рис. 4А) и отрицательным трендом ледовитости (см. рис. 4Б). Рассчитанные между ними коэффициенты корреляции равны соответственно -0,72 и 0,57.

Полученные тренды в изменчивости температуры и скорости течений хорошо согласуются с результатами исследований изменчивости океаниче-

ских процессов в Северной Атлантике и Мировом океане в целом [Hu et al., 2020; Wu et al., 2012; Yang et al., 2016]. Спутниковые наблюдения за высотой и температурой морской поверхности показывают сдвиг к полюсу основных океанических круговоротов в течение последних четырех десятилетий [Yang et al., 2016; Hu et al., 2020]. Кроме того, наблюдается усиление западных течений [Yang et al., 2016] и увеличение в них температуры [Wu et al., 2012]. Данные изменения связывают с увеличением ветрового воздействия [Wu et al., 2012; Yang et al., 2016]. Эти результаты могут служить объяснением наличия положительных трендов в изменчивости скорости течений на северных границах Гольфстрима и Южного пассатного течения, а также высоких значений коэффициента корреляции между ними. Коэффициент линейного тренда скорости течения

в районе северной границы Гольфстрима (район А) выше, чем в его срежневой части (район D) (см. рис. 3Б), что также указывает на сдвиг течения к северу. Необходимо отметить, что в основном этот сдвиг имел место с 1960-х до середины 1990-х гг. Согласованность изменчивости среднегодовой температуры в Баренцевом море с вариациями скорости на северной границе Южного пассатного течения с запаздыванием в один год ($r = 0,72$) также может быть обусловлена одновременными смещениями к полюсу основных океанических круговоротов.

Полученные оценки подтверждают существенное влияние переноса тепла системой Гольфстрим – Северо-Атлантическое течение на Арктический регион. В работе [Polonsky, Sukhonos, 2016] показано, что вклад адвективных переносов тепла и горизонтального турбулентного обмена в низкочастотную

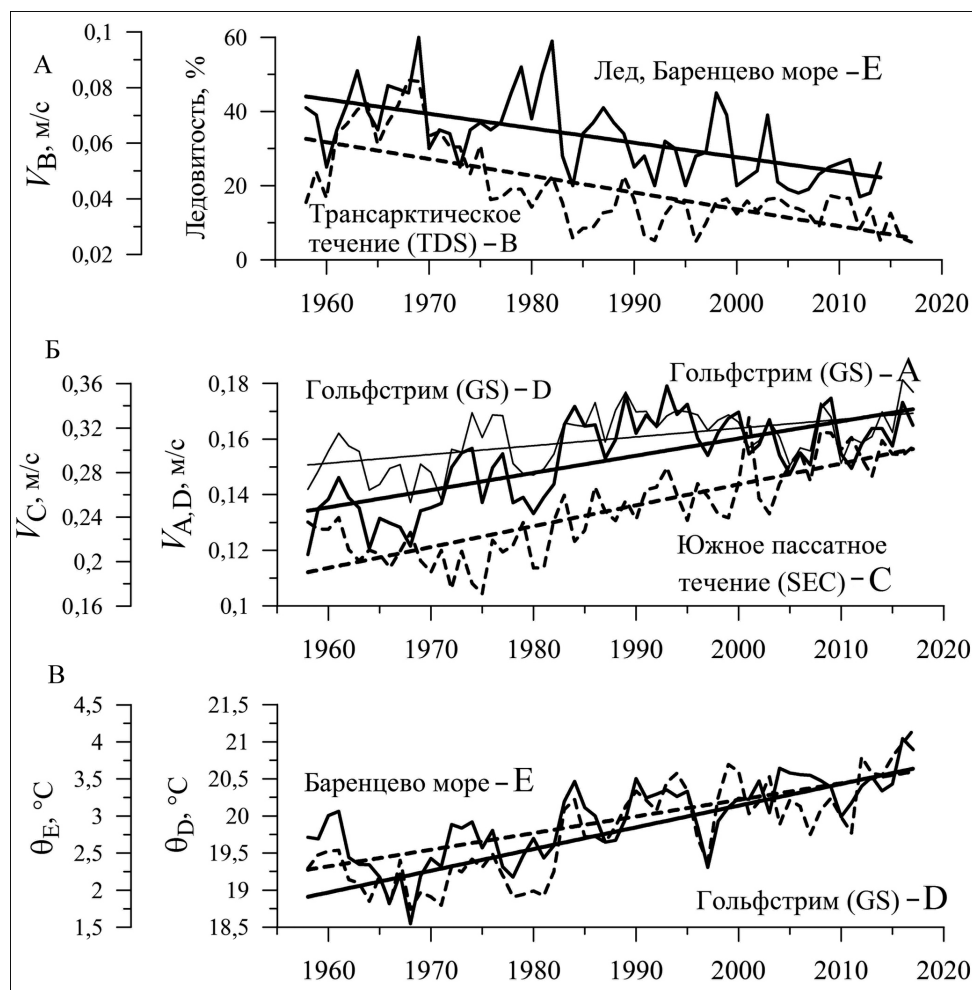


Рис. 4. Межгодовая изменчивость среднегодовых значений и линейные тренды: ледовитости в Баренцевом море и модуля скорости в Трансарктическом течении (район В) (А); в Гольфстриме (район D) – тонкая линия, в районе его северной границы (район А) и на северной границе Южного пассатного течения (район С) (Б); температуры (пунктирная линия) в Гольфстриме (район D) и Баренцевом море (район Е) (В) за 1958–2017 гг.

Fig. 4. Interannual variability of mean annual values and linear trends of: ice extent in the Barents Sea and velocity modulus in the Transpolar Drift Stream (region B) (A); in the Gulf Stream (region D) – a thin line, in the area of its northern border (region A) and on the northern border of the South Equatorial current (region C) (B); temperatures (dotted line) in the Gulf Stream (region D) and the Barents Sea (region E) (B) for 1958–2017

изменчивость температуры верхнего слоя Атлантики превышает вклад тепловых потоков на поверхности океана. При этом важную роль также может играть перенос теплых воздушных масс из Атлантического региона в Арктику [Sato et al., 2014].

ВЫВОДЫ

В работе на основе скоростей течений и температуры поверхностного слоя в Северной Атлантике, океанического реанализа ORA-S4, а также натурных данных о ледовитости Баренцева моря проведен анализ связи между временными рядами среднегодовых и январских значений этих характеристик за 1958–2014 гг. Корреляционный анализ показал, что наиболее значимые связи достигаются при сдвиге в один год для среднегодовых значений и без сдвига – для январских значений.

Получено, что изменение ледовитости и увеличение температуры в Баренцевом море связаны с изменчивостью скорости Трансарктического течения у северной границы моря ($r = 0,57$ и $r = -0,72$ соответственно). Изменчивость температуры в Баренцевом море в исследуемый период наблюдений имела положительную тенденцию, а скорости

Трансарктического течения и ледовитости Баренцева моря – отрицательную. Уменьшение ледовитости в Баренцевом море происходило на фоне увеличения скорости течений в районах северных границ Гольфстрима и Южного пассатного течения, а также при увеличении температуры в стрессе Гольфстрима. Коэффициенты корреляции температуры в Баренцевом море с температурой воды и скоростью течений на северной границе Гольфстрима составляют 0,86 и 0,75 соответственно.

Дальние связи ледовитости в Баренцевом море с изменчивостью течений в Северной Атлантике, несмотря на высокие значения коэффициентов корреляции, имеют опосредованный характер и, вероятно, являются следствием взаимодействия комплекса факторов в системе океан – атмосфера [Russotto, Biasutti, 2020]. Одной из возможных причин полученных связей изменчивости ледовитости в Баренцевом море со скоростью на северных границах Гольфстрима и Южного пассатного течения может служить выявленное в [Yang et al., 2016; Hu et al., 2020] одновременное смещение основных океанических круговоротов к полюсу в последние четыре десятилетия.

Благодарности. Работа выполнена по темам государственного задания ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» (121041400077-1), Морского гидрофизического института РАН «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан – атмосфера, определяющие региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата» (0555-2021-0002), а также при поддержке гранта РНФ (19-17-00110-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.В., Глок Н.И., Смирнов А.В., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Северной Атлантики на колебания климата в районе Баренцева моря и их предсказуемость // Метеорология и гидрология. 2016. № 8. С. 38–56.
- Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Глок Н.И. Влияние аномалий температуры океана в низких широтах на атмосферный перенос тепла в Арктику // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 1. С. 106–123. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-1-106-123.
- Воробьев В.Н., Косенко А.В., Смирнов Н.П. Многолетняя динамика ледового покрова морей западного сектора Арктики и ее связь с циркуляцией атмосферы и океана в Североатлантическом регионе // Изв. РГО. 2010. Т. 142. Вып. 6. С. 52–59.
- Жичкин А.П. Динамика межгодовых и сезонных аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. Т. 1. № 20. С. 55–64.
- Крашенинникова С.Б., Крашенинникова М.А. Причины и особенности долговременной изменчивости ледовитости Баренцева моря // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 1. С. 112–122. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-1-112-122.
- Матишов Г.Г., Дженьюк С.Л. Морская хозяйственная деятельность в Российской Арктике в условиях современных климатических изменений // Экология и экономика. 2012. № 1(5). С. 26–37.
- Семенов В.А., Мартин Т., Беренс Р.К., Латиф М., Астафьева Е.С. Изменение площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей CMIP5 и CMIP3 // Лед и снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 77–107. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-77-107.
- Balmaseda M.A., Mogenssen K., Weaver A.T. Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, vol. 139, no. 674, p. 1132–1161.
- Buettner S., Ivanov V.V., Kassens H., Kusse-Tiuz N.A. Distribution of suspended particulate matter in the Barents Sea in late winter 2019, *Arctic and Antarctic Research*, 2020, vol. 66, no. 3, p. 267–278, DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-267-278.
- Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., Barlow M. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather, *Nature geosciences*, 2014, vol. 7, no. 9, p. 627–637, DOI: 10.1038/ngeo2234.

- Dahlke S., Maturilli M. Contribution of Atmospheric Advection to the Amplified Winter Warming in the Arctic North Atlantic Region, *Advances in Meteorology*, 2017, Article ID 4928620, 8 p., DOI: 10.1155/2017/4928620.
- Hall R.J., Hanna E., Chen L. Winter Arctic Amplification at the synoptic timescale, 1979–2018, its regional variation and response to tropical and extratropical variability, *Climate Dynamics*, 2020, p. 1–17, DOI: 10.1007/s00382-020-05485-y.
- Hu S., Sprintall J., Guan C., McPhaden M., Fan Wang F., Hu D., Cai W. Deep-reaching acceleration of global mean ocean circulation over the past two decades, *Science advances*, 2020, vol. 6, no. 6, p. 1–8, DOI: 10.1126/sciadv.aax7727.
- Krasheninnikova S.B., Demidov A.N., Ivanov A.A. Variability of the Characteristics of the Antarctic Bottom Water in the Subtropical North Atlantic, *Oceanology*, 2021, vol. 61, iss. 2, p. 151–158, DOI: 10.1134/S0001437021020090.
- Krasheninnikova S.B., Shokurova I.G., Shokurov M.V. Winter Currents Velocity and Sea Surface Temperature Anomalies Accompanying the Gulf Stream North Wall Displacements, *Oceanology*, 2020, vol. 60, iss. 1, p. 20–28, DOI: 10.1134/S0001437020010154.
- Leifer I., Chen F.R., McClimans T., Karger F.M. Satellite ice extent, sea surface temperature, and atmospheric methane trends in the Barents and Kara Seas, *The Cryosphere Discussions*, 2018, p. 1–45, DOI: 10.5194/tc-2018-75.
- McCrystall M.R., Hosking J., Maycock A. The impact of changes in tropical sea surface temperatures over 1979–2012 on Northern Hemisphere high-latitude climate, *Journal of Climate*, 2020, vol. 33, no. 12, p. 5103–5121.
- Onarheim I.H., Årthun M. Toward an ice-free Barents Sea, *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44, no. 16, p. 8387–8395, DOI: 10.1002/2017gl074304.
- Polonsky A.B., Sukhonos P.A. Evaluation of the heat balance constituents of the upper mixed layer in the North Atlantic, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, vol. 52, no. 6, p. 649–658, DOI: 10.1134/S0001433816060141.
- Russotto R.D., Biasutti M. Polar amplification as an inherent response of a circulating atmosphere: Results from the TRACMIP aquaplanets, *Geophysical Research Letters*, 2020, vol. 47, no. 6, p. e2019GL086771, DOI: 10.1029/2019GL086771.
- Sato K., Inoue J., Watanabe M. Influence of the Gulf Stream on the Barents Sea ice retreat and Eurasian coldness during early winter, *Environmental Research Letters*, 2014, vol. 9, no. 8, p. 084009, DOI: 10.1088/1748-9326/9/8/084009.
- Schlichtholz P. Subsurface ocean flywheel of coupled climate variability in the Barents Sea hotspot of global warming, *Scientific reports*, 2019, vol. 9, no. 1, p. 1–16, DOI: 10.1038/s41598-019-49965-6.
- Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis, *Global and planetary change*, 2011, vol. 77, no. 1–2, p. 85–96, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2011.03.004.
- Taboada F.G., Anadón R. Patterns of change in sea surface temperature in the North Atlantic during the last three decades: beyond mean trends, *Climatic Change*, 2012, vol. 115, no. 2, p. 419–431, DOI: 10.1007/s10584-012-0485-6.
- Wu L., Cai W., Zhang L., Timmermann A. Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents, *Nature Climate Change*, 2012, vol. 2, no. 3, p. 161–166.
- Yang H., Lohmann G., Wei W., Dima M. Intensification and poleward shift of subtropical western boundary currents in a warming climate, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, vol. 121, no. 7, p. 4928–4945, DOI: 10.1002/2015JC011513.

Поступила в редакцию 26.03.2021

После доработки 19.06.2021

Принята к публикации 09.03.2022

FEATURES OF SURFACE CIRCULATION IN THE NORTH ATLANTIC DURING THE CHANGES IN THE ICE COVER OF THE BARENTS SEA

S.B. Krasheninnikova¹, I.G. Shokurova², A.N. Demidov³

¹A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Functioning of Marine Ecosystems Department, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: svetlanabk@mail.ru

²Marine Hydrophysical Institute of RAS, Oceanography Department, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: igshokurova@mail.ru

³Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: alik1@mail.ru

Specific features of the spatial distribution of the surface currents velocity and the temperature in the North Atlantic were revealed using the ORA-S4 ocean reanalysis under the changing ice cover of the Barents Sea, estimated from the instrumental observations data for 1958–2014. Based on the analysis of spatial distribution of direct correlation coefficients and those with a one-year shift between the indicated parameters, the regions with significant correlation were identified. The highest correlation coefficients between the ice coverage in the Barents Sea were obtained for the regions at the northern boundaries of the Gulf Stream and the South Equatorial current, as well as for the Transpolar Drift Stream. The correlation coefficients of the mean annual temperature values in the Barents Sea with the temperature and velocity of currents in the Gulf Stream are

0,86 and 0,75, respectively. The ice coverage increases with the acceleration of the Transarctic Current. The correlation between temperature in the Barents Sea and the current velocity northwest of Spitsbergen is $-0,72$. Current velocities at the northern border of the Gulf Stream and the South Equatorial current, and temperature in the Gulf Stream and the Barents Sea have positive trends of interannual variability, while the velocity of the Transpolar Drift Stream and the ice coverage in the Barents Sea show negative ones.

Keywords: sea ice, current velocities, SST, long-term variability, the North European Basin

Acknowledgements. The research was carried out in line with the theme of the state task of the A.O. Kovalovsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS “Functional, metabolic and toxicological aspects of the existence of hydrobionts and their populations in biotopes with different physic-chemical regimes” (121041400077-1), and of the Marine Hydrophysical Institute of RAS “Fundamental studies of processes of interaction in the ocean – atmosphere system which determine the regional spatial-temporal variability of the natural environment and climate” (0555-2021-0002), and financially supported by the Russian Science Foundation (project no 19-17-00110-P).

REFERENCES

- Alekseev G.V., Glock N.I., Smirnov A.V., Vyazilova A.E., Ivanov N.E., Smirnov A.V. The Influence of the North Atlantic on Climate Variations in the Barents Sea and Their Predictability, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, no. 8, p. 544–558.
- Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glock N.I. Vliyanie anomalij temperatury okeana v nizkikh shirotah na atmosferyj perenos tepla v Arktiku [Influence of ocean temperature anomalies at low latitudes on atmospheric heat transfer to the Arctic], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2017, vol. 1, p. 106–123, DOI: 10.21513/2410-8758-2017-1-106-123. (In Russian)
- Balmaseda M.A., Mogensen K., Weaver A.T. Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, vol. 139, no. 674, p. 1132–1161.
- Buettner S., Ivanov V.V., Kassens H., Kusse-Tiuz N.A. Distribution of suspended particulate matter in the Barents Sea in late winter 2019, *Arctic and Antarctic Research*, 2020, vol. 66, no. 3, p. 267–278, DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-267-278.
- Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., Barlow M. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather, *Nature geosciences*, 2014, vol. 7, no. 9, p. 627–637, DOI: 10.1038/ngeo2234.
- Dahlke S., Maturilli M. Contribution of Atmospheric Advection to the Amplified Winter Warming in the Arctic North Atlantic Region, *Advances in Meteorology*, 2017, Article ID 4928620, 8 p., DOI: 10.1155/2017/4928620.
- Hall R.J., Hanna E., Chen L. Winter Arctic Amplification at the synoptic timescale, 1979–2018, its regional variation and response to tropical and extratropical variability, *Climate Dynamics*, 2020, p. 1–17, DOI: 10.1007/s00382-020-05485-y.
- Hu S., Sprintall J., Guan C., McPhaden M., Fan Wang F., Hu D., Cai W. Deep-reaching acceleration of global mean ocean circulation over the past two decades, *Science advances*, 2020, vol. 6, no. 6, p. 1–8, DOI: 10.1126/sciadv.aax7727.
- Krashennnikova S.B., Demidov A.N., Ivanov A.A. Variability of the Characteristics of the Antarctic Bottom Water in the Subtropical North Atlantic, *Oceanology*, 2021, vol. 61, iss. 2, p. 151–158, DOI: 10.1134/S0001437021020090.
- Krashennnikova S.B., Krashennnikova M.A. Prichiny i osobennosti dolgovremennoj izmenchivosti ledovitosti Barentseva morya [Causes and Features of Long-Term Variability of the Ice Extent in the Barents Sea], *Led i sneg*, 2019, vol. 59, no. 1, p. 112–122, DOI: 10.15356/2076-6734-2019-1-112-122. (In Russian)
- Krashennnikova S.B., Shokurova I.G., Shokurov M.V. Winter Currents Velocity and Sea Surface Temperature Anomalies Accompanying the Gulf Stream North Wall Displacements, *Oceanology*, 2020, vol. 60, iss. 1, p. 20–28, DOI: 10.1134/S0001437020010154.
- Leifer I., Chen F.R., McClimans T., Karger F.M. Satellite ice extent, sea surface temperature, and atmospheric methane trends in the Barents and Kara Seas, *The Cryosphere Discussions*, 2018, p. 1–45, DOI: 10.5194/tc-2018-75.
- Matishov G.G., Jenyuk S.L. Morskaya hozyajstvennaya deyatel'nost' v rossijskoj Arktike v usloviyah sovremennykh klimaticheskikh izmenenij [Marine economic activity in the Russian Arctic under present-day climate changes], *Ekologiya i ekonomika*, 2012, vol. 1, no. 5, p. 26–37. (In Russian)
- McCrystall M.R., Hosking J., Maycock A. The impact of changes in tropical sea surface temperatures over 1979–2012 on Northern Hemisphere high-latitude climate, *Journal of Climate*, 2020, vol. 33, no. 12, p. 5103–5121.
- Onarheim I.H., Årthun M. Toward an ice-free Barents Sea, *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44, no. 16, p. 8387–8395, DOI: 10.1002/2017gl074304.
- Polonsky A.B., Sukhonos P.A. Evaluation of the heat balance constituents of the upper mixed layer in the North Atlantic, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, vol. 52, no. 6, p. 649–658, DOI: 10.1134/S0001433816060141.
- Russotto R.D., Biasutti M. Polar amplification as an inherent response of a circulating atmosphere: Results from the TRACMIP aquaplanets, *Geophysical Research Letters*, 2020, vol. 47, no. 6, p. e2019GL086771, DOI: 10.1029/2019GL086771.
- Sato K., Inoue J., Watanabe M. Influence of the Gulf Stream on the Barents Sea ice retreat and Eurasian coldness during early winter, *Environmental Research Letters*, 2014, vol. 9, no. 8, p. 084009, DOI: 10.1088/1748-9326/9/8/084009.
- Schlichtholz P. Subsurface Ocean flywheel of coupled climate variability in the Barents Sea hotspot of global warming, *Scientific reports*, 2019, vol. 9, no. 1, p. 1–16, DOI: 10.1038/s41598-019-49965-6.
- Semenov V.A., Martin T., Berens R.K., Latif M., Astafieva E.S. Izmenenie ploshchadi arkticheskikh morskikh

- l'dov v ansamblyah klimaticheskikh modelej CMIP5 i CMIP 3 [Changes in the area of Arctic Sea ice in the ensembles of CMIP5 and CMIP3 climate models], *Led i sneg*, 2017, vol. 57, no. 1, p. 77–107, DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-77-107. (In Russian)
- Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis, *Global and planetary change*, 2011, vol. 77, no. 1–2, p. 85–96, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2011.03.004.
- Taboada F.G., Anadón R. Patterns of change in sea surface temperature in the North Atlantic during the last three decades: beyond mean trends, *Climatic Change*, 2012, vol. 115, no. 2, p. 419–431, DOI: 10.1007/s10584-012-0485-6.
- Vorobiev V.N., Kosenko A.V., Smirnov N.P. Mnogoletnyaya dinamika ledovogo pokrova morej zapadnogo sektora Arktiki i ee svyaz' s cirkulyaciej atmosfery i okeana v Severoatlanticheskom regione [Long-term dynamics of the sea ice cover in the western sector of the Arctic and its relationship with the circulation of the atmosphere and the ocean in the North Atlantic region], *Izv. RGO*, 2010, vol. 142, iss. 6, p. 52–59. (In Russian)
- Wu L., Cai W., Zhang L., Timmermann A. Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents, *Nature Climate Change*, 2012, vol. 2, no. 3, p. 161–166.
- Yang H., Lohmann G., Wei W., Dima M. Intensification and poleward shift of subtropical western boundary currents in a warming climate, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, vol. 121, no. 7, p. 4928–4945, DOI: 10.1002/2015JC011513.
- Zhichkin A.P. Dinamika mezhgodovyh i sezonnyh anomalij ledovitosti Barentseva i Karskogo morej [Dynamics of interannual and seasonal anomalies in the ice extent of the Barents and Kara seas], *Vestnik Kol'skogo nauchnogo centra RAN*, 2015, vol. 1, no. 20, p. 55–64. (In Russian)

Received 26.03.2021

Revised 19.06.2021

Accepted 09.03.2022

ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ВПАДИНЫ БАРЕНЦЕВА МОРЯ В ПОЗДНЕЛЕДНИКОВЬЕ – ГОЛОЦЕНЕ

О.В. Руденко¹, Е.Е. Талденкова², С.И. Шкарубо³, А.А. Руденко⁴

¹ ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», институт естественных наук и биотехнологии, доц., канд. геогр. наук; e-mail: olrudenko2011@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: etaldenkova@mail.ru

^{3,4} АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция»

³ Главный геолог, канд. геол.-минерал. наук; e-mail: sergeysh@mage.ru

⁴ Геолог 1-й кат.; e-mail: rudenko.aa@mage.ru

На основе комплексного анализа вариаций литологии и состава ископаемых остатков (пыльцы, спор, водных палиноморф, бентосных и планктонных фораминифер, остракод) по разрезам двух грунтовых колонок и сравнения полученных результатов с опубликованными данными по строению осадочной толщи шельфа Баренцева моря выделены три осадочных горизонта, соответствующих климатически обусловленным этапам развития обстановок седиментации в Центральной впадине Баренцева моря. Споры, пыльца и водные палиноморфы в данном регионе изучены впервые. Полученные данные свидетельствуют о кардинальной перестройке природной среды на этапе дегляциации от приледникового опресненного морского бассейна с почти круглогодичным ледовым покровом к удаленному от края ледника сильно ледовитому морскому бассейну, который, в свою очередь, в голоцене сменился нормально морским гемипелагическим. Переход к морскому типу осадконакопления и становление более соленых и стабильных условий палеосреды хорошо диагностируется в осадках по их тонкозернистому составу, снижению количества материала ледового и айсбергового разноса, доли переотложенных спор и пыльцы, а также появлению морских цист динофлагеллат, значительному росту численности микрофауны и увеличению концентрации растительных микроостатков. Для наиболее благоприятных условий среднего голоцена характерны увеличение видового разнообразия бентосных фораминифер, появление тепловодных форм в ассоциации планктонных фораминифер, а также максимум пыльцы берез в пыльцевых спектрах, что в совокупности свидетельствует об усилении влияния атлантических вод и широком распространении березовых формаций на материковой суше.

Ключевые слова: палеогеография, материал ледового и айсбергового разноса, пыльца, споры, водные палиноморфы, фораминиферы, остракоды

ВВЕДЕНИЕ

Арктический регион является важнейшим объектом изучения процессов, обусловивших изменения природной среды на этапе дегляциации и в голоцене [Павлидис и др., 1998; Полякова, 1997; Иванова, 2006; Elverhøi, Solheim, 1983; Stein, 2008], и вот уже несколько десятилетий находится в центре внимания международных междисциплинарных программ (например, IGBP, PAGES, WCRP, QUEEN, APEX, PastGateways и др.). Для Баренцева моря, активно изучаемого комплексом геофизических, геологических, геоморфологических методов и абсолютного датирования, реконструированы основные черты развития со времени последнего ледникового максимума и разрушения Баренцево-Карского ледника [Gataullin et al., 2001; Hughes et al., 2016]. Но даже для него все еще нет полной информации о донных осадках и седиментационных процессах, а предлагаемые стратиграфические схемы и палеогеографические реконструкции во многом

дискуссионны и недостаточно обоснованы палеонтологически. В частности, имеется относительно мало данных по открытой части Баренцева моря – Центральной впадине. Этот район окончательно освободился от ледника 15–14 тыс. кал. л. н. [Hughes et al., 2016]. Сейсмическими исследованиями и геологическим опробованием выявлено трехчленное строение толщи новейших отложений, залегающей на мезозойских отложениях ложа и сформированной в течение одного гляциоседиментационного цикла [Блажишин и др., 1989; Гатауллин, Поляк, 1990; Спиридонов и др., 1992; Gataullin et al., 1993]. Изучение литологии осадков, состава ископаемых комплексов фораминифер и изотопного состава их раковин, подкрепленное радиоуглеродным датированием в целом подтвердили эти представления и позволили охарактеризовать изменения палеосреды в рамках соответствующих этапов дегляциации и голоцена, а также оценить их возраст [Корсун и др., 1994; Polyak et al., 1995, 2000; Polyak,

Mikhailov, 1996; Мурдмаа, Иванова, 1999; Погодина, Тарасов, 2002; Ivanova et al., 2002; Duplessy et al., 2005; Иванова, 2006; Murdmaa et al., 2006]. В ранее исследованных колонках и скважинах из Центральной депрессии и прилегающего трога

Персей (рис. 1) надежно датированы отложения голоценового возраста [Polyak, Mikhailov, 1996; Ivanova et al., 2002; Murdmaa et al., 2006], тогда как в бедных микрофоссилиями дегляциальных осадках датировки единичны.

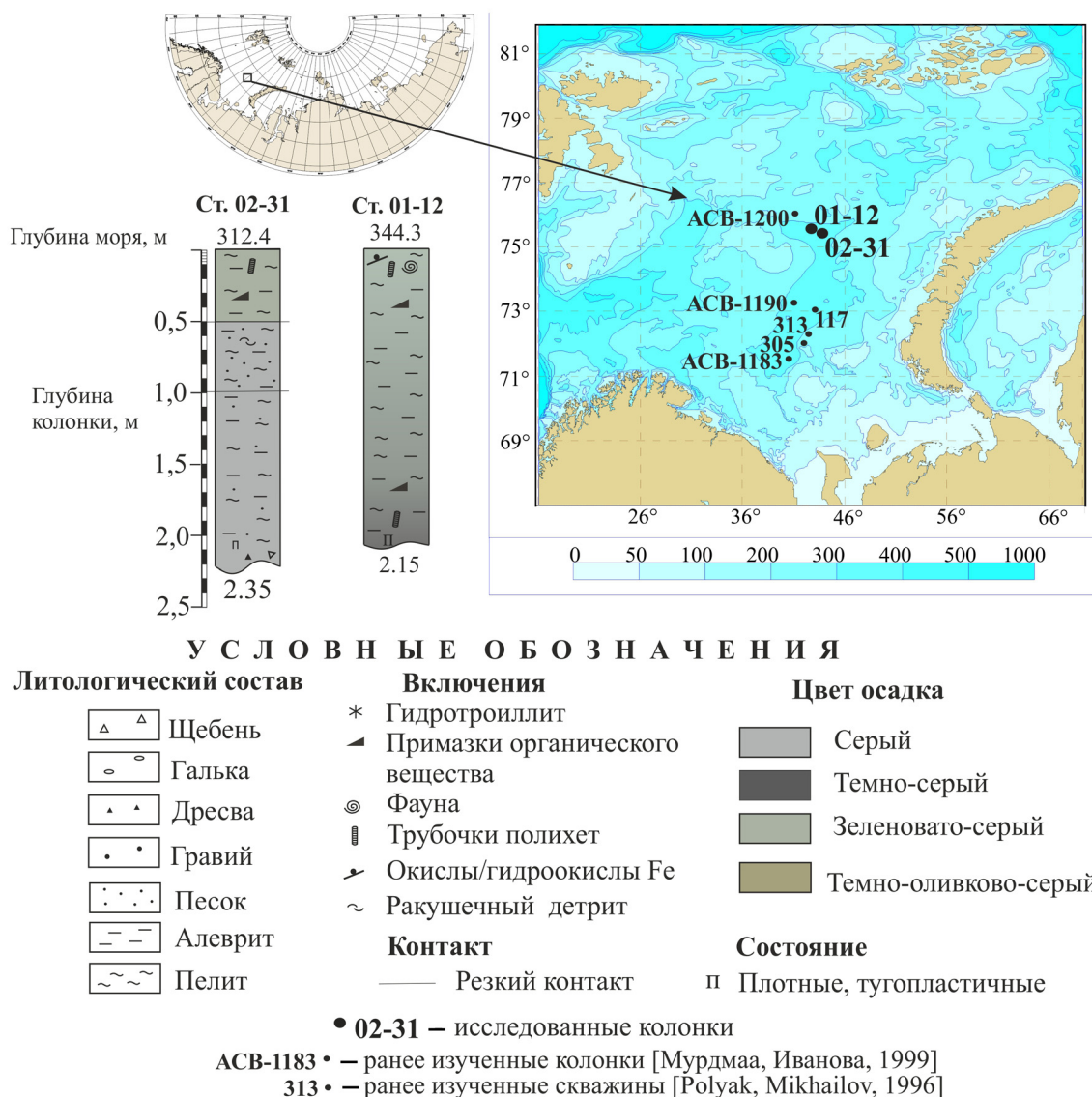


Рис. 1. Расположение изученных колонок 01-12 и 02-31 в Центральной впадине Баренцева моря и их полевое литологическое описание (батиметрическая карта Баренцева моря на основе цифрового атласа GEBCO 97). Также показаны ранее исследованные колонки и скважины из региона

Fig. 1. Location of the studied cores 01-12 and 02-31 in the Central Deep of the Barents Sea and their onboard lithological description (Bathymetric map of the Barents Sea based on the GEBCO 97 digital atlas). The previously studied cores and boreholes from the region

Слой III соответствует эпохе ранней дегляциации древнее 15 тыс. кал. л. н. Представлен проксимальными гляциально-морскими глинистыми отложениями с редкими современными и перетолженными древними микрофоссилиями, накапливавшимися в условиях холодного морского опресненного бассейна.

Слой II соответствует основной фазе дегляциации и началу голоцена от примерно 15 до 11–10 тыс. кал. л. н. Характеризуется появлением разнообразных тонкослоистых песчаных илов с материалом айсбергового разноса, а также склоновых отложений в виде турбидитов, накапливавшихся в условиях дистальных ледниково-морских бас-

сейнов. Для него характерны небогатые в видовом отношении арктические комплексы бентосных фораминифер, которые иногда включают как переотложенные древние формы, так и редкие виды, свидетельствующие об эпизодическом проникновении подповерхностных атлантических вод. В пределах этого слоя выделяется период перерыва в осадконакоплении, соответствующий похолоданию позднего дриаса (около 13–11,5 тыс. кал. л. н.), возможно, связанный с развитием многолетнего ледового покрова и уменьшением скоростей седиментации [Polyak et al., 1995, 2000; Polyak, Mikhailov, 1996; Ivanova et al., 2002].

Слой I соответствует голоценовым морским гемипелагическим, преимущественно илистым отложениям со следами биотурбации, которые накапливались при относительно низких, в сравнении с временем дегляциации, скоростях осадконакопления менее 10 см/тыс. лет [Мурдмаа, Иванова, 1999]. Голоценовые слои содержат богатые, но изменчивые в пространстве и времени комплексы современных микрофоссилий, включая виды, свидетельствующие о периодическом проникновении подповерхностных атлантических вод, которое было наиболее выраженным 5–8 тыс. кал. л. н.

В данной работе мы представляем результаты изучения особенностей осадконакопления в Центральной впадине на основе сопоставления результатов исследования двух колонок донных осадков, поднятых с разных глубин в ее малоисследованной северной части (см. рис. 1), с описанными выше опубликованными данными.

Керны донных осадков изучены комплексом методов – литологическим, микрофаунистическим и маринопалинологическим, причем последним впервые. Данные работы являлись составной частью донного опробования и изучения вещественного состава верхнекайнозойского осадочного чехла на листе Госгеолкарты 1:1 000 000 масштаба S-38 (Баренцево море, восточная часть). Материал для исследований получен в 2014 г. в рейсах научно-исследовательских судов АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (МАГЭ, г. Мурманск).

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Центральная впадина оконтурена 300-метровой изобатой, имеет субмеридиональную ориентировку и состоит из двух замкнутых отрицательных форм рельефа (северной и южной) с глубинами более 350 м, разделенных безымянным поднятием. С запада обрамлена массивными изолированными подводными возвышенностями – Центральной и Персей, а с востока – серией валообразных поднятий (Адмиралтейский вал).

Гидрологический режим акватории Баренцева моря формируется в результате циркуляции вод различного происхождения: а) теплых и соленых, поступающих из северной части Атлантического океана; б) сравнительно холодных местных (баренцевоморских); в) холодных полярных, поступающих с северо-востока. Центральная впадина заполнена холодными однородными по солености (34,7‰ зимой и 34,5‰ летом) баренцевоморскими водами, представляющими собой по большей части трансформированные атлантические воды. Температура воды в Центральной впадине относительно однородна по всей толще зимой, летом понижается от небольших положительных значений на поверхности до $-1,75^{\circ}\text{C}$ у дна.

В центральной части моря в области контакта холодных и соленых вод Центральной впадины с основной ветвью Нордкапского течения, водами западной периферии Новоземельского течения и относительно распресненными речным стоком водами Мурманского течения образуются фронтальные зоны. Самой протяженной и наиболее отчетливо выраженной является та, что проходит с запада на восток между 73 и 76° с. ш. и разделяет воды атлантического происхождения от местных баренцевоморских (Полярный фронт). С сентября по апрель преобладают ветры северных и юго-западных румбов, суммарная повторяемость которых составляет 35–50%. С мая по август наиболее часто отмечаются ветры от северных до северо-западных с суммарной повторяемостью в пределах 35–50%.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изученные колонки 201401-12 ($75^{\circ}30.535'$ с. ш.; $42^{\circ}38.030'$ в. д.; длина 215 см) и 201402-31 ($75^{\circ}20.757'$ с. ш.; $43^{\circ}47.663'$ в. д.; длина 235 см) подняты в северной части Центральной впадины Баренцева моря с глубин 312 и 344 м соответственно (см. рис. 1). (Далее по тексту колонки будут именоваться 01-12 и 02-31.)

Для литологического и микрофаунистического исследования в обеих колонках отбирались образцы мощностью 5 см (иногда 10 см) с интервалом 10–20 см. Образцы высушивались, взвешивались, промывались на сите с диаметром ячеек 63 мкм и снова взвешивались. В результате было определено весовое процентное содержание фракции >63 мкм.

Для изучения терригенного материала ледового и айсбергового разноса (ice- and iceberg-rafted debris, IRD) подсчитаны зерна пород и кварца во фракции >500 мкм. Содержание IRD в осадках арктических морей позволяет судить как о динамике ледниковых щитов, окружающих Арктический бассейн, так и о вариациях размера морского ледового

покрова [Stein, 2008]. В образцах из нижней части колонки 02-31 встречено много обломков каменного угля, они посчитаны отдельно. Содержание зерен IRD показано относительно 100 г сухого непромытого осадка.

Микрофауна (бентосные и планктонные фораминиферы, остракоды) изучались под биноклем во фракции >125 мкм. Общая численность микрофоссилий пересчитывалась на 1 г сухого непромытого осадка. Биоразнообразие определялось как количество видов в образце. Относительная численность видов бентосных фораминифер, самой многочисленной группы микрофоссилий, была оценена в образцах, содержащих более 20 раковин, что является не совсем статистически достаточным даже для осадков с низким биоразнообразием [Fatela, Taborda, 2002], но может быть условно применимо для обедненных арктических комплексов. В большинстве проб планктонные фораминиферы и остракоды встречаются редко, поэтому для них процентное содержание видов не подсчитывалось. В нижней части колонки 02-31 в интервале 105–235 см встречены многочисленные переотложенные бентосные фораминиферы (коричневые карбонатные и древние агглютинированные), которые не учитывались при подсчете общей численности и процентного содержания видов.

Для палинологического анализа интервал пробоотбора был уменьшен до 10 см. Техническая обработка образцов проведена по стандартной методике В.П. Гричука [Палеопалинология, 1966] с использованием соляной кислоты для растворения карбонатов, обработки пирофосфатом натрия, 10%-м раствором КОН, последующей декантацией дистиллированной водой для удаления пелитовой фракции и экстракцией палиноморф в тяжелой жидкости с удельным весом 2,2. Идентификация микрофоссилий осуществлялась при 400-кратном увеличении с привлечением опубликованных атласов и ключей [Куприянова, 1965; Куприянова, Алешина, 1972; Палеопалинология, 1966; Reille, 1992]. Для подсчета концентрации в начале химической обработки к взвешенному образцу добавлялась одна таблетка спор-маркеров *Lycopodium clavatum* с фиксированным количеством спор [Stockmarr, 1971].

Палинодиаграммы построены с использованием пакета программ Tilia и TGView [Grimm, 1993; 2004]. При подсчете процентных соотношений за 100% принята сумма пыльцы древесных и кустарниковых (AP) и травянистых и кустарничковых растений (NAP) – AP + NAP. Процентная доля пыльцы водных и прибрежно-водных растений, а также спор подсчитана от этой суммы. Кроме того, изучены непыльцевые (водные) палиноморфы (НПП) – органические остатки микроорганизмов морского

(цисты динофлагеллат) и пресноводного (колониальные зеленые водоросли) генезиса. Их процентные доли рассчитаны от суммы AP + NAP. Переотложенные компоненты палиноспектров (далее в тексте ПС) подсчитывались дополнительно, а их процентная доля рассчитана от общей суммы микрофоссилий, зарегистрированных в образце. Докайнозойская переотложенная пыльца и споры изучались с целью получения информации о возрасте коренного ложа района исследования и определения возможных источников и направлений сноса переотложенного материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Литология осадков. Осадки колонок представлены пелитовыми алевритами серых и оливково-серых оттенков (см. рис. 1). Колонка 01-12 литологически сравнительно однородна, осадки содержат примазки органического вещества, раковины моллюсков, трубочки полихет. Похожие осадки в колонке 02-31 присутствуют в верхних 50 см, ниже они опесчанены, а ближе к основанию содержат обильные щебнистые и дресвяные включения.

Содержание крупнозернистой составляющей осадков в колонке 01-12 колеблется от 0,4 до 1%, увеличиваясь в приповерхностном горизонте (табл. 1, рис. 2). Количество IRD невелико, оно немного возрастает лишь в одном образце на глубине 185–190 см. Это позволяет считать большую часть осадков, вскрытых колонкой 01-12, однородными глинисто-алевритистыми морскими осадками.

Осадки колонки 02-31 по литологическим характеристикам четко подразделяются на две толщи (см. табл. 1, рис. 2).

Верхние 100 см представлены однородными глинисто-алевритистыми морскими осадками, немного опесчаненными в интервале 70–100 см. Весовые проценты фракции >63 мкм в них близки к осадкам, вскрытым в колонке 01-12, расположенной на 30 м глубже, тогда как количество IRD немного выше. Ниже 100 см содержание крупнозернистой фракции резко увеличивается до максимума – 52% в интервале 135–145 см, после чего постепенно снижается вниз по разрезу, в целом оставаясь повышенным (около 15%). Содержание IRD в нижней части колонки также велико, особенно у основания разреза. Во всех образцах ниже 135 см постоянно присутствуют обломки каменного угля, доминируя в интервале глубин 135–205 см.

Литологические особенности строения разрезов изученных колонок хорошо согласуются с ранее полученными данными по колонкам и скважинам из Центральной впадины (см. рис. 1) [Polyak, Mikhailov, 1996; Мурдмаа, Иванова, 1999; Ivanova et al., 2002; Murdmaa et al., 2006]. Голоценовые

осадки повсеместно представлены гемипелагическими однородными пелитовыми илами, иногда опесчаненными, с увеличенным содержанием грубозернистых включений, как, например, в нижней части голоценовой толщи в скв. 117, 305 и 313 возрастом около 10–11 тыс. кал. л. н. и в нижней части голоценовых осадков колонки АСВ-1183 возрастом древнее и моложе единственного датированного в этой колонке уровня в 10,7 тыс. кал. л. н. [Ivanova et al., 2002]. Все эти разрезы расположены южнее исследованных нами колонок и ближе к берегу, с чем и могло быть связано периодическое увеличение содержания грубозернистой составляющей осадков. Мощность голоценовых отложений в Центральной впадине обычно составляет 1,5–2 м, но может уменьшаться до 20 см, как в колонке АСВ-1190, или увеличиваться до 260 см, как в колонке АСВ-1183 [Мурдмаа, Иванова, 1999]. Возраст начала голоценовой гемипелагической седиментации также варьирует между примерно 11 тыс. кал. л. н. на юге и 10 тыс. кал. л. н. на севере моря [Ivanova et al., 2002]. Судя по литологическим характеристи-

кам осадков изученных нами колонок, голоценовые отложения слагают весь разрез колонки 01-12 мощностью 215 см и верхние 100 см в колонке 02-31.

Дегляциальные осадки присутствуют в колонке 02-31 ниже 100 см (см. рис. 2). Их отличительной чертой является большое количество IRD, поступавшего в морские осадки с айсбергами, откалывавшимися от края отступающего ледника. По совокупности литологических характеристик обогащенные IRD дегляциальные осадки можно подразделить на три слоя. Базальные отложения (205–235 см) характеризуются сочетанием сравнительно тонкозернистого состава осадков (вес. % фракции >63 мкм менее 20%) и максимального количества IRD (400 обл./100 г), преимущественно представленного обломками различных пород. Осадки в диапазоне 140–205 см сильно опесчанены, характеризуются периодическим увеличением количества IRD до 200 обл./100 г, преобладанием обломков угля над породами. Осадки в интервале 100–140 см отличаются ростом количества зерен кварца в составе IRD (см. табл. 1).

Таблица 1

Результаты литологического анализа донных осадков Центральной впадины Баренцева моря

№ п/п	Интервал, см	Вес сухого осадка, г	Вес промытого осадка, г	Вес. % >63 мкм	Общее кол-во обломков >500 мкм	Кол-во обломков кварца	Кол-во обломков пород	Кол-во обломков угля
Колонка 01-12								
1	0–5	14,7	0,30	2,06	1	0	1	0
2	10–15	12,3	0,13	1,06	3	0	3	0
3	25–30	21,7	0,20	0,94	1	0	1	0
4	45–50	23,7	0,16	0,69	5	3	2	0
5	65–70	14,7	0,16	1,06	2	0	2	0
6	85–90	28,9	0,16	0,55	3	3	0	0
7	105–110	23,9	0,09	0,36	3	3	0	0
8	125–130	17,1	0,17	0,99	2	0	2	0
9	145–150	13,5	0,07	0,51	1	0	1	0
10	165–170	44,0	0,27	0,62	2	2	0	0
11	185–190	19,3	0,22	1,15	10	4	6	0
12	205–210	33,1	0,23	0,69	0	0	0	0
Колонка 02-31								
1	0–5	18,2	0,50	2,76	11	6	5	0
2	5–10	15,1	0,20	1,33	4	2	2	0
3	10–15	20,2	0,15	0,76	5	3	2	0
4	25–30	13,7	0,17	1,21	5	4	1	0
5	45–50	11,0	0,15	1,37	11	4	7	0
6	65–70	36,8	0,86	2,34	15	8	7	0
7	85–90	31,3	2,92	9,32	55	29	26	0
8	105–110	22,3	4,22	18,9	12	3	9	0
9	135–145	57,7	30,0	52,0	113	0	16	97
10	175–185	40,5	14,2	34,9	12	0	3	9
11	205–210	34,6	4,65	13,4	46	5	10	31
12	225–230	75,0	11,9	15,9	288	2	262	24

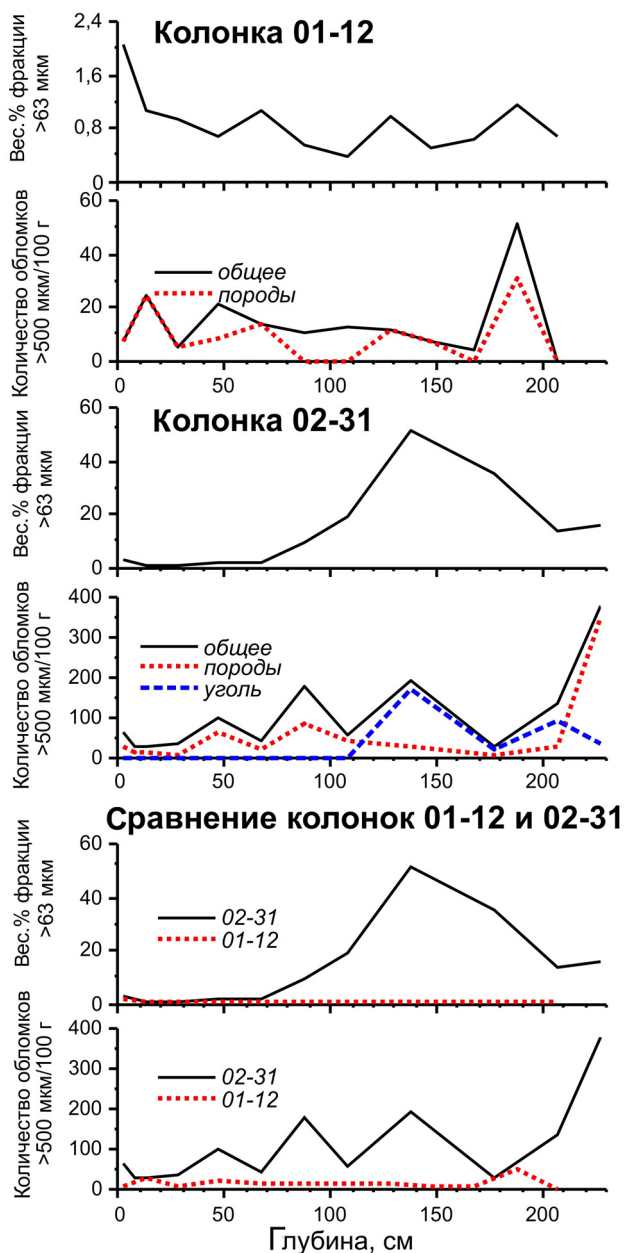


Рис. 2. Литологические характеристики колонок 01-12 и 02-31

Fig. 2. Lithological features of cores 01-12 and 02-31

Таким образом, можно заключить, что осадки колонки 01-12 и верхние 100 см осадков колонки 02-31 соответствуют голоцену или слою I в принятом подразделении осадочной толщи шельфа Баренцева моря [Polyak et al., 1995; Polyak, Mikhailov, 1996; Мурдмаа, Иванова, 1999; Ivanova et al., 2002; Иванова, 2006]. Дегляциальные осадки слоя II присутствуют в колонке 02-31 в диапазоне 100–205 см, а осадки, соответствующие слою III, вскрываются в основании этой колонки на глубине 205–235 см.

Палиостратиграфия. Все изученные в обеих колонках образцы содержат гетерохронные ПС с различной степенью сохранности микрофоссилий.

Споры и пыльца четвертичного и голоценового возраста имеют отличную сохранность, а дочетвертичные, как правило, неудовлетворительную и крайне плохую, за исключением раннемеловых спор схизейных и трехлучевых спор *Leiotriletes* юрско-раннемелового возраста. Подавляющая часть переотложенных микрофоссилий имеет локальный генезис, учитывая возраст коренных пород исследуемого региона [Геологическая..., 1983], и, вероятно, поступает в осадки за счет донной абразии. Так, численно доминирующие *Picea* sp., *Pinus* sp., споры глейхениевых и схизейных, представленные вариативными видами родов *Lygodium* и *Anemia*, характерны для отложений готеррив-баррема; для апт-альбских отложений характерны *Ginkgo* sp., *Podocarpus unica* Bolch., *Taxodiaceae/Cupressaceae*, *Cycas glabra*, *Bennettites* spp., *Gleichenia delicata* Bolch., споры *Polypodiaceae*. В осадках колонки 02-31 доля переотложенных микрофоссилий варьирует в пределах от 100% в интервале 180–235 см до 35–50% в верхней части разреза (см. рис. 3А). В осадках колонки 01-12 доля дочетвертичных переотложенных спор и пыльцы особенно значительна в интервале 205–210 см и достигает почти половины от общего числа зарегистрированных микрофоссилий (см. рис. 3Б).

Колонка 02-31. Таксономическое разнообразие непереотложенной части ПС в основном определяется вариациями в травяно-кустарничковой части ПС, в то время как состав пыльцы древесных растений довольно выдержан по разрезу, что в целом типично для ПС морских осадков. Микрофоссилии, в количестве, достаточном для процентного подсчета, зарегистрированы лишь в верхнем метре разреза. В интервале 180–235 см встречены лишь единичные споры и пыльца докайнозойского возраста. Отсутствие непереотложенной пыльцы в осадках данного интервала, вероятно, связано с экстремально неблагоприятными для растений климатическими условиями на прилегающей суше. Последующие видимые изменения процентных соотношений между основными группами микрофоссилий и доминантами ПС позволили разделить палинодиаграмму на четыре локальных пыльцевых зоны (далее в тексте ПЗ).

ПЗ I (100–180 см) выделена условно по присутствию пыльцы и спор молодого возраста, в количестве, достаточном для процентного подсчета, лишь в интервале 177–180 см и по единичным находкам пыльцы *Pinus silvestris*, *Betula nana*-type и спор *Polypodiaceae* на глубинах 100–180 см. В образце из интервала 177–180 см максимальна для всего разреза доля пыльцы злаков, полыней и сложноцветных (в сумме до 31,7%), пыльца сосны и кустарничковой березы содержится примерно в равных долях. Таксономический состав ПЗ I сходен

с составом провинциальной палинозоны *Oxyria-Artemisia*, установленной в разрезе озерных отложений о. Андоя (северная Норвегия) и прослеженной в осадках Маланген-фьорда, севера Финляндии и Кольского полуострова [Шарапова, 2005]. По составу характерных таксонов зона *Oxyria-Artemisia*, под верхней границей которой получена датировка 10470 ± 130 ^{14}C ВР [Шарапова, 2005], коррелируется с верхнедриасовыми осадками, изученными Т. Нильсоном [Nilsson, 1964] в южной Швеции.

В группе спор доминируют арктические и циркумбореальные виды плаунов. Примечательно,

что на диаграммах Кольского полуострова [Лебедева, 1977] и юго-западной части Баренцева моря [Руденко, 2008] максимум плаунов характерен для начала пребореального периода голоцена, тогда как на палинодиаграмме колонки 02-31 из Центральной впадины он проявлен в интервале 177–180 см в пределах дегляциальной части разреза. Возможно, споры плаунов занесены в эту часть акватории Баренцева моря с территории Норвегии, где они появляются в осадках, сопоставляемых с концом дегляциального времени [Birks, 2015].

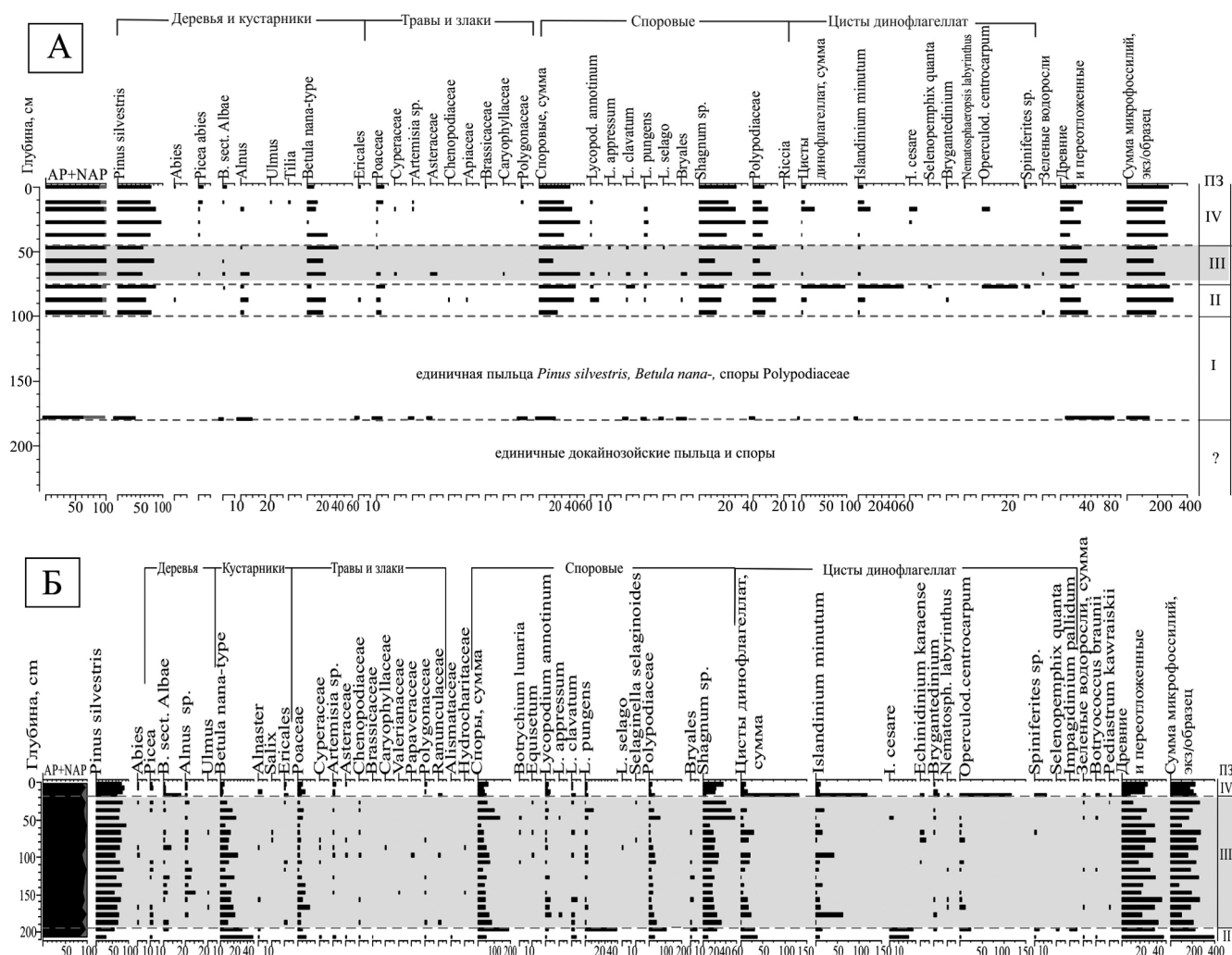


Рис. 3. Палинодиаграммы исследованных колонок 02-31 (А) и 01-12 (Б) : затемнением показана ПЗ III, отражающая наиболее благоприятные климатические условия времени накопления осадков

Fig. 3. Palynological diagrams of cores 02-31 (A) and 01-12 (B) : darkening highlights PZ III corresponding to the most favorable climatic conditions of the sediment accumulation period

Группа водных палиноморф представлена единичными цистами типичного для арктических морей криофильного вида *Islandinium minutum*, экологические условия обитания которого определяются невысокими летними температурами, редко превышающими $+7^{\circ}\text{C}$ [Matthiessen, 1995].

В целом состав ПЗ I характеризует весьма суровые климатические условия, характерные для конца позднего дриаса, в которых на окраинной материковой суше могли существовать лишь холодные тундровые ландшафты с низким флористическим разнообразием и доминированием аркто-альпийских

кустарничков, что согласуется с ландшафтными реконструкциями по северной [Birks, 2015] и восточной Норвегии [Mangerud et al., 2018], основанными на пыльцевых данных озерных осадков.

Последующие изменения состава ПС в разрезе колонки 02-31 позволяют предположить, что формирование осадков, соответствующих ПЗ I, относится к этапу перехода от дегляциации к началу голоцена.

Для ПЗ II (75–100 см) характерен максимум содержания пыльцы кустарничковых берез (до 60%) в ее нижней части. Вверх по разрезу ее роль в составе ПС резко уменьшается за счет большего количества пыльцы сосны и появления пыльцы древовидных берез, ольхи и, единично, ели и пихты. Содержание пыльцы злаков все еще значительно (до 20%) по всей ПЗ II, тундровое разнотравье становится более разнообразным по составу. В споровой части спектров доминируют споры сфагновых мхов. Концентрация пыльцы в ПЗ II остается низкой и не превышает $5,7 \times 10^3$ экз/г, в то же время концентрация переотложенной пыльцы докайнозойского возраста в этой части разреза достигает $17,7 \times 10^3$ экз/г.

Изменения состава ПС в ПЗ II, вероятно, отражают климатические условия нарастания влаго- и теплообеспеченности, что способствовало значительному увеличению пыльцевой продуктивности растений и обусловило продвижение к северу границы таежной зоны и ветровой занос пыльцы сосны и ели в открытую акваторию Баренцева моря. В прибрежных районах материка распространялись ландшафты кустарничковой тундры, судя по преобладанию в ПС пыльцы *Betula nana*-type и присутствию пыльцы вересковых.

В группе палиноморф в ПЗ II увеличивается доля морских цист динофлагеллат и их видовое разнообразие, в том числе появляются и достигают максимальных процентных значений виды *Operculodinium centrocarpum* и *Spiniferites* sp., в арктических морях маркирующие зону влияния водных масс Северной Атлантики [Vernal et al., 1997].

Наиболее благоприятным условиям среднего голоцена отвечает ПЗ III (45–75 см), хотя изменения в составе спектров на диаграмме колонки 02-31 незначительны. Главным аргументом мы считаем максимум пыльцы кустарничковых берез и присутствие пыльцы *Betula* sect. *Albae*, сопоставляя таксономический состав морских ПС с ПС, выделенными из осадков среднего голоцена Кольского полуострова. В этом районе на всех диаграммах среднего голоцена проявлен абсолютный максимум березы – «березовое время» [Лебедева, 1977; Шарапова, 2005]. Кроме того, в количествах, на порядок превышающих таковое в субфоссильных

ПС открытого моря, присутствует пыльца ольхи (более 10% против 0,5–1% в субфоссильных). Эта особенность свидетельствует о том, что осадки, соответствующие ПЗ III, сформированы в условиях повышенной влагообеспеченности, обусловившей распространение на материковой суше ольховых сообществ, вероятнее всего, вдоль речных долин и межскальных ниш. Концентрация пыльцы также увеличивается примерно вдвое.

ПЗ IV (0–45 см) отражает похолодание климата, обусловившее снижение пыльцевой продуктивности растений, о чем свидетельствует уменьшение содержания пыльцы злаков, кустарничковых берез, ольхи, почти полное исчезновение пыльцы растений, типичных для тундрово-луговых сообществ. Вероятно, похолодание сказалось и на температурных характеристиках морского бассейна, так как в нижней части ПЗ IV исчезли цисты динофлагеллат. Вновь они появляются лишь в верхних 20 см разреза. Концентрация пыльцы в ПЗ IV достигает максимальных значений в ее нижней части (до 34×10^3 экз/г).

Колонка 01-12. Выделенные ПЗ этой колонки хорошо коррелируются с ПЗ голоценовой части колонки 02-31. ПЗ II, соответствующая интервалу 195–215 см, характеризуется доминированием пыльцы карликовых берез и злаков и коррелируется с ПЗ II колонки 02-31; ПЗ III (20–195 см) отличается увеличением содержания дальнезаносной пыльцы сосны, ольхи и спор сфагновых мхов, а также максимальным количеством пыльцы берез, и, следовательно, коррелируется с ПЗ III колонки 02-31; пыльца и споры, извлеченные из приповерхностных 20 см, отражают условия, близкие современному.

Группа водных палиноморф более разнообразна по составу, чем в осадках колонки 02-31, доминирует *I. minutum*, а вверх по разрезу резко увеличивается доля *O. centrocarpum*.

Концентрация пыльцы в осадках колонки 01-12 по всему разрезу на порядок выше, чем в осадках колонки 02-31, достигая максимальных значений в верхней части ПЗ III (до $40,8 \times 10^4$ экз/г).

Планктонные фораминиферы. В изученных колонках планктонные фораминиферы немногочисленны (табл. 2). Они отсутствуют или встречаются в виде единичных экземпляров в дегляциальной части разреза колонки 02-31; в этой колонке, помимо верхних 10 см, небольшое увеличение их количества отмечено в интервале 65–90 см. Повышенное содержание раковин, до 2–4 экз/г, отмечено в верхних 150 см колонки 01-12 и в верхних 10 см колонки 02-31, т. е. в осадках, которые по литологическим признакам отнесены нами к голоцену (рис. 4).

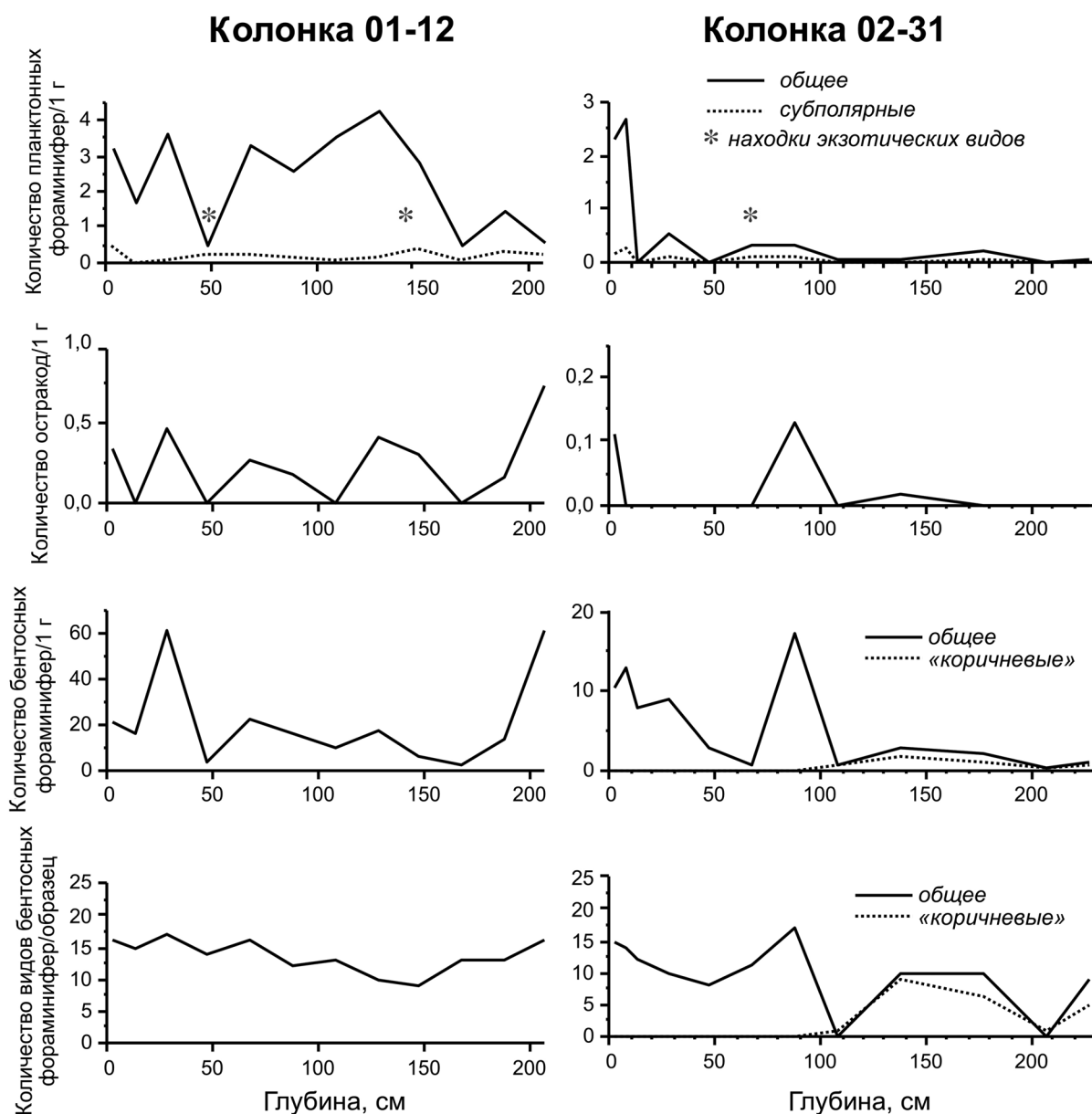


Рис. 4. Общая численность всех групп микрофауны, видовое разнообразие бентосных фораминифер и находки экзотических планктонных фораминифер в колонках 01-12 и 02-31

Fig. 4. Total abundance of all macrofaunal groups, taxonomic diversity of benthic foraminifers, and occurrences of exotic planktonic foraminifers in cores 01-12 and 02-31

Во всех образцах в составе планктона преобладает полярный вид *Neogloboquadrina pachyderma* sin., единственным исключением является образец 45–50 см в колонке 01-12. Этот образец выделяется незначительным количеством раковин, вероятно, из-за растворения, а также присутствием не только субполярного вида *Globigerinita glutinata*, но и экзотических тепловодных видов *Globigerinoides ruber* и *Globorotalia truncatulinoides*. Единичные раковины *G. ruber* встречаются еще дважды – в образце 145–150 см в колонке 01-12 и в образце 65–70 см в колонке 02-31. Помимо вышеперечисленных видов, среди субполярной группы планктонных фо-

раминифер встречаются также *Neogloboquadrina pachyderma* dex., *Turborotalita quinqueloba* и *Globigerina bulloides*. Мы не встречали опубликованных данных о видовом составе субполярных фораминифер и присутствии экзотического планктона в осадках колонок из Центральной депрессии. Однако повышенное содержание планктонных фораминифер (в основном, *N. pachyderma* sin.) в осадках раннего – среднего голоцена отмечено многими исследователями [Polyak, Mikhailov, 1996; Ivanova et al., 2002; Murdmaa et al., 2006] и объясняется периодическим проникновением в шельфовые депрессии подповерхностных атлантических вод.

Таблица 2

Распределение планктонных фораминифер в осадках колонок 01-12 и 02-31

№ п/п	Интервал, см	<i>Neoglobobulimina pachyderma</i> sin.	<i>Neoglobobulimina pachyderma</i> dex.	<i>Turborotalita quinqueloba</i>	<i>Globobulimina glutinata</i>	<i>Globobulimina ruber</i>	<i>Globobulimina truncatulinoides</i>	<i>Globobulimina bulloides</i>	н/о	Всего, экз/обр.	Численность, экз/1 г
Колонка 01-12											
1	0–5	40	3	4						47	3,2
2	10–15	21								21	1,7
3	25–30	77	1	1						79	3,6
4	45–50	5			1	4	1			11	0,5
5	65–70	44	1		2				1	48	3,3
6	85–90	70	3							73	2,5
7	105–110	83	1	1						85	3,6
8	125–130	70	1	1	1					73	4,3
9	145–150	33	1	1	2	1				38	2,8
10	165–170	18	3							21	0,5
11	185–190	23	2	1	2					28	1,5
12	205–210	11	5		1					17	0,5
Колонка 02-31											
1	0–5	38			3				1	42	2,3
2	5–10	36	3		1					40	2,7
3	10–15									0	0
4	25–30	6	1							7	0,5
5	45–50									0	0
6	65–70	8	1			2			1	12	0,3
7	85–90	7	1	2						10	0,3
8	105–110	1								1	0,15
9	135–145	2								2	0,04
10	175–185	6						1		7	0,2
11	205–210									0	0
12	225–230	1								1	0,01

Бентосные фораминиферы. Данная группа – самая многочисленная и таксономически разнообразная (до 20 видов на образец) среди микрофоссилий из осадков изученных колонок (см. рис. 4). Их максимальная численность в осадках колонки 01-12 достигает 60 экз/г. В среднем она составляет 10–20 экз/г в осадках этой колонки и в верхней части колонки 02-31, т. е. в осадках, соответствующих голоцену. В дегляциальных осадках колонки 02-31 бентосных фораминифер мало. Похожие значения численности характерны для комплексов бентосных фораминифер из голоценовых и поздне-дегляциальных осадков соседних колонок (см. рис. 1) [Polyak, Mikhailov, 1996; Ivanova et al., 2002]. Самые высокие показатели численности отмечены в нижней части колонки 01-12, где раковины имеют хорошую сохранность и практически не несут

следов растворения, что, скорее всего, можно объяснить высокими скоростями осадконакопления в эпоху перехода от поздней дегляциации к голоцену, что было отмечено ранее для осадков Центральной впадины [Polyak, Mikhailov, 1996].

Комплексы бентосных фораминифер из осадков нижней части колонки 02-31 глубже 100 см отличаются низкой численностью раковин и присутствием переотложенных секреционных фораминифер коричневого цвета, что по аналогии с ранее исследованными колонками дает основание отнести эти осадки к дегляциальным слоям III и II [Polyak, Mikhailov, 1996; Мурдмаа, Иванова, 1999; Ivanova et al., 2002]. Среди «коричневых» раковин встречаются как современные виды (например, *Elphidium clavatum* и *Cassidulina reniforme*), так и переотложенные древние формы. Здесь встречаются древние

агглютированные фораминиферы, причем интересно, что существует даже некоторая периодичность: осадки в интервалах 105–110 см и 205–210 см не содержат никаких бентосных фораминифер, кроме древних агглютированных, тогда как остальные образцы из интервала с «коричневыми» фораминиферами содержат сравнительно разнообразную смесь как современных, так и перетолженных видов. Мы предполагаем, что такая цикличность может отражать вариации интенсивности поступления талых вод и IRD айсбергового разноса в осадки палеобассейна в ходе дегляциации.

Распределение по разрезу наиболее массовых современных видов бентосных фораминифер по-

казано на рис. 5. В нижней части дегляциальных осадков колонки 02-31 преобладает оппортунистический вид *E. clavatum*, характерный для опресненных обстановок, с повышенной мутностью вод за счет влияния талых ледниковых вод со взвешенными пелитовыми частицами («ледниковым молоком») и высокими скоростями седиментации [Polyak, Mikhailov, 1996]. Комплекс с преобладанием *E. clavatum* характерен для ранне-дегляциальных осадков колонок из Центральной впадины. Например, в скважине 313 этот обедненный комплекс представлен в основном мелкими ювенильными раковинами, что указывает на стрессовые условия обитания микрофауны.

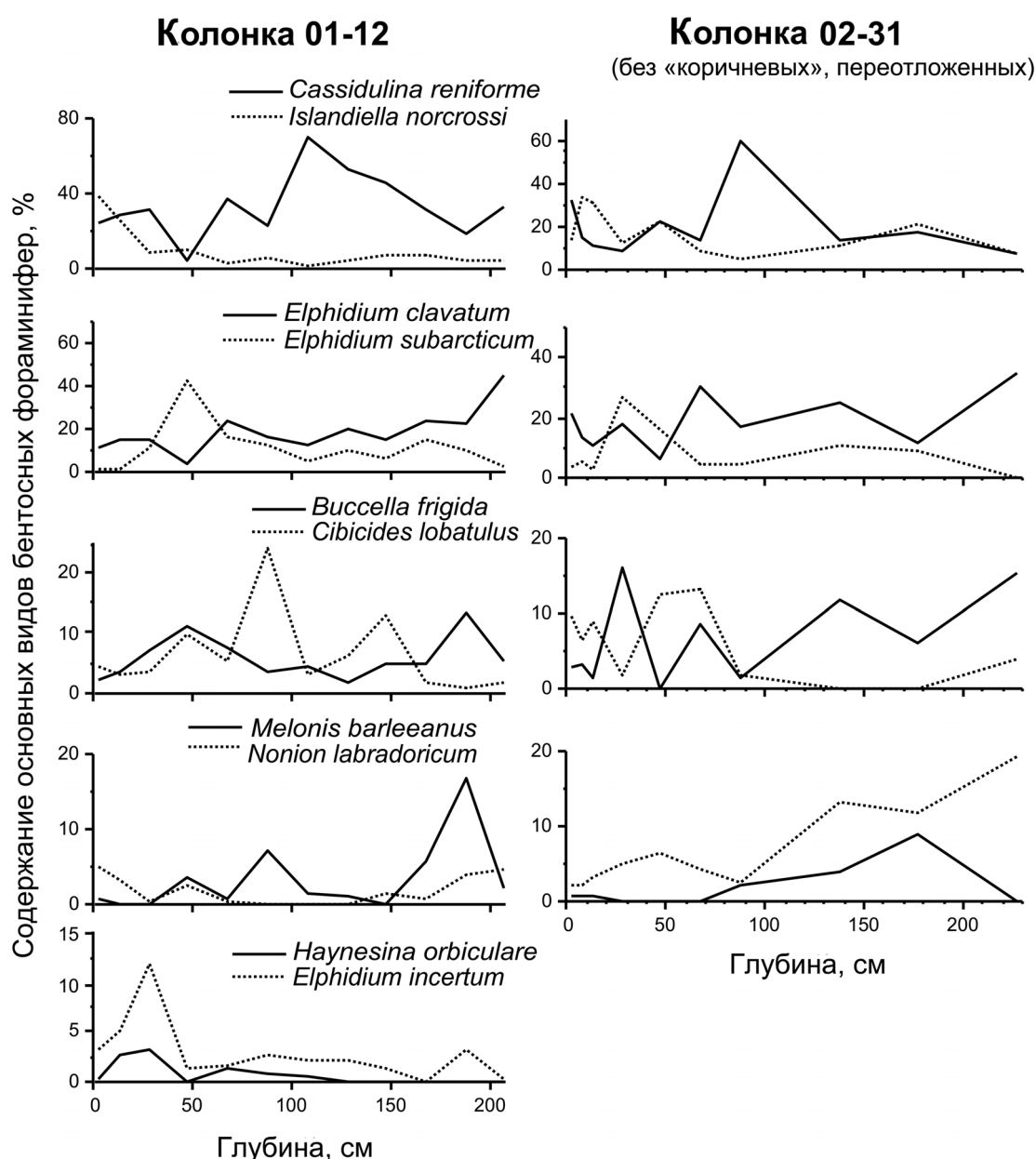


Рис. 5. Процентное содержание основных видов бентосных фораминифер в колонках 01-12 и 02-31

Fig. 5. Relative abundance of the major benthic foraminifer species in cores 01-12 and 02-31

Картина распределения видов в более молодых осадках обеих колонок имеет много общего. Три наиболее массовых вида *E. clavatum*, *C. reniforme* и *Islandiella norcrossi* сменяют друг друга по разрезу. По мере отступления ледника в более дистальных обстановках времени перехода к раннему голоцену с достаточно высокими скоростями седиментации, холодными придонными водами и сезонным ледовым покровом преобладал арктический холодноводный вид *C. reniforme*. Пик содержания *C. reniforme* хорошо выражен в обеих изученных колонках. Он достигает 60% на глубине 85–90 см в колонке 02-31 и 70% на глубине 105–110 см в колонке 01-12 (см. рис. 5). Пик этого вида обычно отмечается в переходный период от поздней дегляциации к раннему голоцену и в раннем голоцене [Polyak, Mikhailov, 1996; Мурдмаа, Иванова, 1999; Ivanova et al., 2002]. В скважинах 117, 303, 305 процентное содержание *C. reniforme* достигает 40–50% в период времени около 11,5–9 тыс. кал. л. н. [Polyak, Mikhailov, 1996].

Помимо доминирования *C. reniforme*, для начала голоцена характерно повышенное содержание относительно глубоководного вида *Melonis barleeanus*. Этот вид считается индикатором дистальных морских обстановок с постоянным поступлением органики, а его повышенное содержание в раннем – среднем голоцене также связывается с усилением влияния атлантических вод [Polyak, Mikhailov, 1996]. Подобные пики *M. barleeanus* выражены в колонке 01-12 в интервалах 185–190 и 85–90 см. Пик *M. barleeanus* в нижней дегляциальной части колонки 02-31 в образце с глубины 175–185 см не характерен для ископаемых комплексов Баренцева моря. С одной стороны, надо учитывать, что данные по содержанию видов в дегляциальных осадках колонки 02-31 не совсем статистически репрезентативны ввиду низкой общей численности раковин (см. «Материалы и методы»). Но в любом случае, появление *M. barleeanus* в основании колонки 02-31 свидетельствует о проникновении подповерхностных атлантических вод в центральные глубокие районы Баренцева моря на ранней стадии дегляциации.

Ископаемые сообщества, сменившие в колонках комплекс с преобладанием *C. reniforme*, характеризуются высокой численностью фораминифер, возросшим видовым разнообразием, отсутствием явно доминантного вида. Многочисленны такие виды, как *Elphidium subarcticum*, *I. norcrossi*, *Buccella frigida*, *C. reniforme*, *M. barleeanus*, *Nonion labradoricum*, *Cibicides lobatulus*, появляется *Trifarina fluens*. В этом же интервале максимально присутствие раковин тепловодных субполярных и экзотических планктонных фораминифер. Комплекс отражает развитие открытого морского бассейна с относительно высокой продуктивностью

вод, возможно, испытывавшего более сильное влияние атлантических вод, чем в настоящее время. Увеличение процентного содержания *C. lobatulus* и *E. subarcticum*, которое характерно для осадков соседней колонки АСВ-1200 и скважин 313 и 117 возрастом более 5–6 тыс. кал. л. н., связывается с интенсификацией придонной гидродинамической обстановки в связи с усилением влияния арктических вод и активизацией фронтальных процессов при их взаимодействии с атлантическими водами [Polyak, Mikhailov, 1996; Ivanova et al., 2002; Иванова, 2006].

Постепенный рост процентного содержания *E. clavatum* в верхних частях колонок, наряду с *C. reniforme* и *I. norcrossi*, свидетельствует о похолодании и росте ледовитости в позднем голоцене. С этим же, скорее всего, связано увеличение содержания мелководных видов из опресненных прибрежных районов (*Haynesina orbiculare*, *Elphidium incertum*), которые могли приноситься со льдами из северных районов Баренцева и из Карского морей.

Остракоды. Остатки остракод в колонках редки и немногочисленны, только в основании колонки 01-12 их численность превышает 0,5 экз/г (см. рис. 4). В основном, они приурочены к голоценовым отложениям. Все находки представлены видами, широко распространенными на шельфе и континентальном склоне арктических морей – *Sarsicytheridea punctillata*, *S. bradii*, *Cluthia cluthae*, *Semicytherura complanata*, *Cytheropteron elaei*, *Rabulimys mirabilis*, *Heterocyprideis sorbyana*, *Krithe* sp. [Stepanova et al., 2007].

Корреляция колонок. По совокупности описанных результатов комплексного анализа и сравнения полученных данных с принятым подразделением осадочной толщи шельфа Баренцева моря [Polyak et al., 1995; Polyak, Mikhailov, 1996; Мурдмаа, Иванова, 1999; Ivanova et al., 2002; Иванова, 2006] выявлено, что осадки эпохи дегляциации вскрываются только в колонке 02-31 ниже 100 см (рис. 6). Самый нижний горизонт в интервале 205–235 см характеризуется сочетанием сравнительно тонкозернистого состава осадков и максимального количества IRD, крайне низкой численностью микрофауны, преобладанием оппортунистического вида бентосных фораминифер *E. clavatum*, обилием переотложенных бентосных фораминифер и присутствием исключительно докайнозойской пыли. Литологические особенности осадков и специфический набор микрофоссилий свидетельствуют о том, что седиментация происходила в приледниковом опресненном морском бассейне начальной фазы дегляциации, возраст которой оценивается как предшествующий 15 тыс. кал. л. н. [Polyak, Mikhailov, 1996].

Осадки колонки 02-31 в интервале 100–205 см стадии поздней дегляциации (см. рис. 6) сильно

опесчанены, характеризуются периодическим увеличением количества IRD, в них по-прежнему много переотложенных бентосных фораминифер и докайнозойских пыльцевых зерен, но при этом немного увеличивается численность современной микрофауны, а с глубины 180 см появляются современная пыльца, споры и редкие цисты динофлагеллат. Для этого же уровня характерно некоторое улучшение придонных условий, выраженное сменой доминирующей микрофауны от *E. clavatum*, характерного для стрессовых обстановок, к виду *C. reniforme*, а также появление вида *M. barleeanus*, который считается индикатором присутствия подповерхностных атлантических вод. Осадки колонки 02-31 в интервале 100–205 см соответствуют слою II поздней дегляциации, их накопление происходило в удаленном от края ледника морском бассейне с обилием айсбергов и сезонным ледовым покровом.

нант от *E. clavatum*, характерного для стрессовых обстановок, к виду *C. reniforme*, а также появление вида *M. barleeanus*, который считается индикатором присутствия подповерхностных атлантических вод. Осадки колонки 02-31 в интервале 100–205 см соответствуют слою II поздней дегляциации, их накопление происходило в удаленном от края ледника морском бассейне с обилием айсбергов и сезонным ледовым покровом.

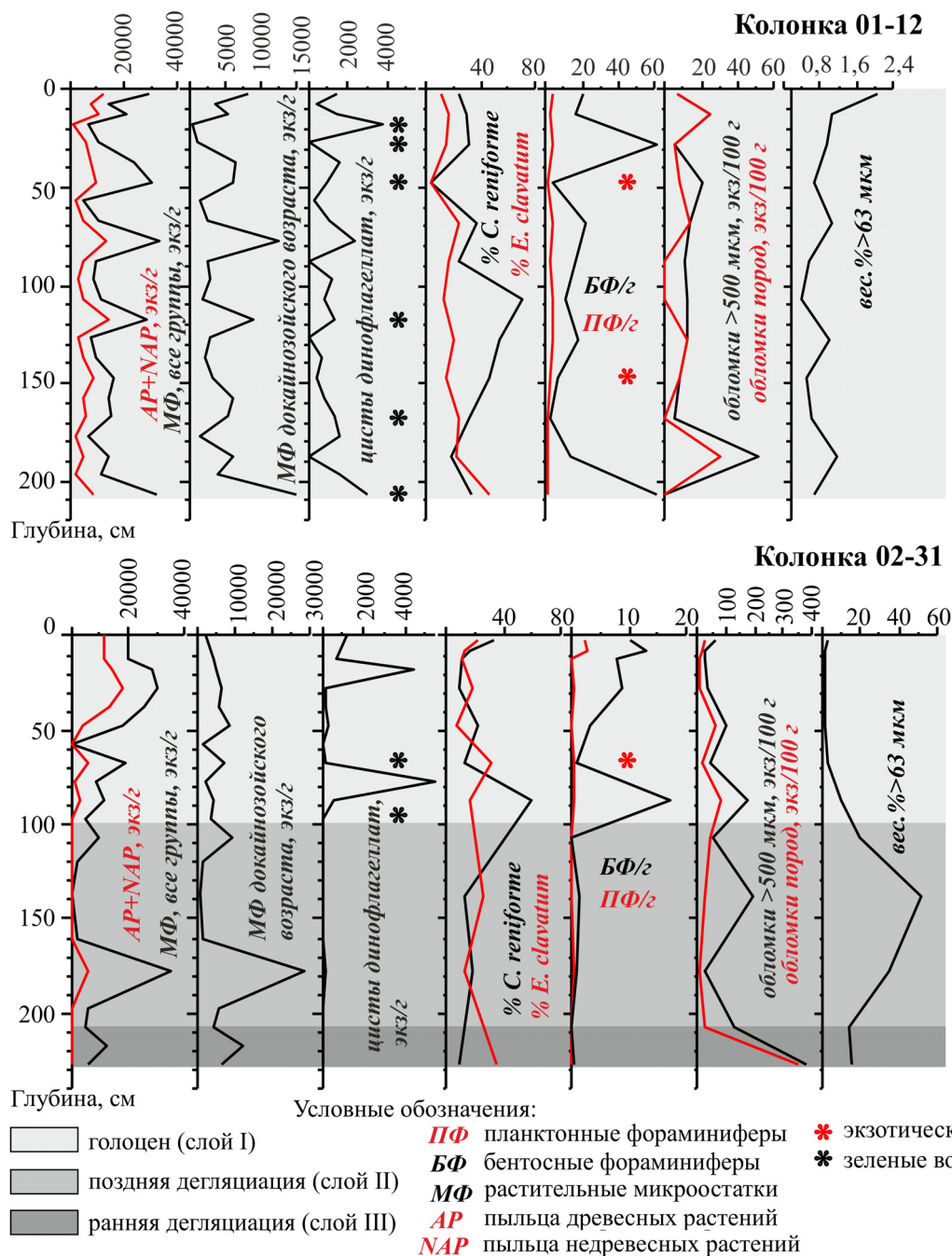


Рис. 6. Корреляция исследованных колонок 01-12 и 02-31 и предполагаемый возраст осадков по совокупности ряда литологических, микрофаунистических и палинологических характеристик. Необходимо учитывать различную размерность шкал абсцисс для некоторых характеристик между колонками

Fig. 6. Correlation of studied cores 01-12 and 02-31 and age assessment of sediment units according to the combination of lithological, microfaunal and palynological characteristics. Different X-axis scaling between the cores should be considered

Вся толща осадков колонки 01-12 и верхние 100 см разреза колонки 02-31 коррелируются с голоценовым слоем I в принятом подразделении осадочной толщи шельфа Баренцева моря. Данные осадки формировались в нормально-морских гемипелагических условиях, причем, скорости седиментации в колонке 02-31 были ниже, чем в колонке 01-12, расположенной на 30 м ниже на склоне Центральной впадины, с которого сноился осадочный материал. Отложения начала голоцена с небольшим количеством крупнозернистого материала, возросшей численностью микрофоссилий и пиком содержания арктического вида бентосных фораминифер *C. reniforme* характеризуют становление более соленых и стабильных условий палеосреды. Ледовый покров сохранялся, но сокращался в размерах. Развитые выше по разрезу комплексы с высокой численностью бентосных фораминифер разнообразного таксономического состава, присутствием экзотического тепловодного планктона соответствуют наиболее теплой фазе трансгрессии с существенным влиянием подповерхностных атлантических вод. Некоторое укрупнение гранулометрического состава осадков, увеличение роли фораминифер из мелководных районов моря отражает постепенное похолодание климата и усиление ледовитости бассейна в позднем голоцене.

Климатическая обстановка начала голоцена была холоднее современной, что показывают ПС тундрового типа с доминированием злаков, тундровых кустарничков и арктических плаунов. С последующим развитием трансгрессии мы связываем нарастание влагообеспеченности, обусловившей заболачивание на материке и распространение кустарничковой тундры на побережье и лесотундры с участием ели южнее. Данные выводы хорошо согласуются с реконструкциями, основанными на комплексном изучении донных осадков озера Имандра в центральной части Кольского полуострова [Lenz et al., 2021], а также разрезов севера [Шарапова, 2005] и запада Кольского полуострова [Kremenetski et al., 1997].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блажчишин А.И., Айбулатов Н.А., Поляк Л.В., Хаиров М.Б. Строение и условия формирования верхнечетвертичной толщи в Приновоземельском районе Баренцева моря // Проблемы кайнозойской палеоэкологии и палеогеографии морей Северного Ледовитого океана. Тезисы докладов 3-й Всесоюзной конференции. Апатиты. 1989. С. 6–7.
- Гатауллин В.Н., Поляк Л.В. О присутствии ледниковых отложений в Центральной впадине Баренцева моря // Доклады АН СССР. 1990. Т. 314. № 6. С. 1463–1467.

ВЫВОДЫ

Изучение вещественного состава донных осадков одного из наименее изученных районов Баренцева моря, Центральной впадины, и заключенных в них растительных микроостатков, бентосных и планктонных фораминифер и остракод позволило выявить изменения палеоокеанологической ситуации в этой части морского бассейна и сопоставить их с глобальными климатическими событиями конца позднего плейстоцена и голоцена. Полученные результаты хорошо согласуются с опубликованными данными по южной части Центральной впадины и прилегающим районам баренцевоморского шельфа и свидетельствуют о кардинальной перестройке природной среды на этапе дегляциации с дальнейшим широким развитием морской трансгрессии в голоцене. Выделены три стадии в развитии акватории: а) стадия приледникового опресненного морского бассейна с практически круглогодичным ледовым покровом; б) стадия морского ледовитого бассейна, удаленного от края ледника с большим количеством айсбергов и сезонным ледовым покровом; в) стадия со стабильными нормально-морскими условиями среды.

Переход к морскому типу осадконакопления и становление по мере развития трансгрессии более соленых и стабильных условий палеосреды хорошо диагностируются в осадках колонки 02-31 на глубине 100 см по снижению количества IRD, песчаной фракции, доли переотложенных спор и пыльцы, а также по появлению морских цист динофлагеллат и значительному росту численности микрофауны.

Состав многочисленного и разнообразного комплекса бентосных фораминифер в осадках среднего голоцена и присутствие тепловодных планктонных фораминифер, свидетельствующих об усилении влияния подповерхностных атлантических вод, указывают на наиболее благоприятные условия палеосреды, что подтверждают и палинологические данные. Осадки, соответствующие среднему голоцену, характеризуются максимальной концентрацией пыльцы и отражают этап распространения березовых формаций на материковой суше.

- Геологическая карта Северного Ледовитого океана и сопредельных территорий. Масштаб 1:1 500 000. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1983.

- Иванова Е.В. Глобальная термohалинная палеоциркуляция. М.: Научный мир, 2006. 320 с.

- Корсун С.А., Погодина И.А., Тарасов Г.А., Матишов Г.Г. Фораминиферы Баренцева моря (гидробиология и четвертичная палеоокеанология). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1994. 136 с.

- Куприянова Л.А. Палинология срезкоцветных. М.: Наука. 1965. 215 с.
- Куприянова Л.А., Алешина Л.А. Пыльца двудольных флоры европейской части СССР. Л.: Наука. 1972. 438 с.
- Лебедева Р.М. Палинологические уровни в голоценовых отложениях Колского полуострова и их абсолютная стратиграфия. Стратиграфия и палеогеография четвертичного периода Севера европейской части СССР. Петрозаводск: Изд-во Карельского филиала АН СССР. 1977. С. 29–39.
- Мурдмаа И.О., Иванова Е.В. Последледниковая история осадконакопления в шельфовых впадинах Баренцева моря // Литология и полезные ископаемые. 1999. № 6. С. 576–595.
- Павлидис Ю.А., Ионин А.С., Щербаков Ф.А., Дунаев Н.Н., Никифоров С.М. Арктический шельф: позднечетвертичная история как основа прогноза развития. М.: ГЕОС, 1998. 187 с.
- Палеопалинология / под ред. И.М. Покровской. Л.: Недра. 1966. Т. 1. С. 34–39.
- Погодина И.А., Тарасов Г.А. Процессы седиментации и эволюции фораминифер во время последней дегляциации в Баренцевом море // Океанология. 2002. Т. 42. № 1. С. 156–160.
- Полякова Е.И. Арктические моря Евразии в позднем кайнозое. М.: Научный мир, 1997. 146 с.
- Руденко О.В. Биостратиграфия и корреляция позднелесточен-голоценовых осадков юго-западной части Баренцева моря // Новости палеонтологии и стратиграфии. Вып. 10–11. Приложение к журналу «Геология и геофизика». Т. 48. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. С. 464–467.
- Спиридонов М.А., Рыбалко А.Е., Поляк Л.В. Стратиграфия верхнечетвертичных отложений Новоземельского шельфа и палеогеография восточной части Баренцева моря в позднем плейстоцене – голоцене // Осадочный покров гляциального шельфа северо-западных морей России: сб. науч. тр. СПб., 1992. С. 47–68.
- Шарапова А.Ю. Верхний плейстоцен и голоцен Северной Фенноскандии и Баренцева моря (стратиграфия, абсолютная хронология, палеогеография): автореф. дис. ... д-ра геогр.-минерал. наук. СПб., 2005. 32 с.
- Birks H. South to north: Contrasting late-glacial and early-Holocene climate changes and vegetation responses between south and north Norway, *The Holocene*, 2015, vol. 25(1), p. 37–52.
- Duplessy J.-C., Cortijo E., Ivanova E., Khusid T., Labeyrie L., Levitan M., Murdmaa I., Paterne M. Paleooceanography of the Barents Sea during the Holocene, *Paleoceanography*, 2005, vol. 20, iss. 4, DOI: 10.1029/2004PA001116.
- Elverhøi A., Solheim A. The Barents Sea ice sheet – sedimentological discussion, *Polar Research*, 1983, vol. 1, no. 1, p. 23–41.
- Fatela F., Taborda R. Confidence limits of species proportions in microfossil assemblages, *Mar. Micropal.*, 2002, vol. 45, p. 169–174.
- Gataullin V., Mangerud J., Svendsen J.I. The extent of the Late Weichselian ice sheet in the southeastern Barents Sea, *Glob. Planet. Change*, 2001, vol. 31, p. 453–474.
- Gataullin V.N., Polyak L.V., Epstein O.G., Romanyuk B.F. Glacigenic deposits of the Central Deep: a key to the Late Quaternary evolution of the eastern Barents Sea, *Boreas*, 1993, vol. 22, p. 47–58.
- Grimm E.C. *TGView*, Illinois State Museum, Research and Collections Center, Springfield, 2004.
- Grimm E.C. *TILIA 2.0 Version b.4* (Computer Software), Illinois State Museum, 1993.
- Hughes A.L.C., Gyllenkreutz R., Lohne Ø.S., Mangerud J., Svendsen J.I. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, *DATED-1, Boreas*, 2016, DOI: 10.1111/bor.12142.
- Ivanova E.V., Murdmaa I.O., Duplessy J.-C., Paterne M. Late Weichselian to Holocene paleoenvironments in the Barents Sea, *Glob. Planet. Change*, 2002, vol. 34, p. 209–218.
- Kremenetski C., Vashchalova T., Goriachkin S., Cherkinsky A., Sulerzhitsky L. Holocene pollen stratigraphy and bog development in the western part of the Kola Peninsula, Russia, *Boreas*, 1997, vol. 26, p. 91–102.
- Lenz M., Savelieva L., Frolova L., Cherezova A., Moros M., Baumer M.M., Gromig R., Kostromina N., Nigmatullin N., Kolka V., Wagner B., Fedorov G., Melles M. Lateglacial and Holocene environmental history of the central Kola region, northwestern Russia revealed by a sediment succession from Lake Imandra, *Boreas*, 2021, vol. 50, p. 76–100.
- Mangerud J., Birks H.H., Halvorsen L.S., Hughes A.L.C., Nashoug O., Nystuen J.P., Paus A., Sørensen R., Svendsen J.I. The timing of deglaciation and sequence of pioneer vegetation at Ringsaker, eastern Norway – and an earthquake-triggered landslide, *Norwegian J. Geol.*, 2018, no. 98(3), p. 315–332.
- Matthiessen J. Distribution patterns of dinoflagellate cysts and other organic-walled microfossils in Recent Norwegian-Greenland Sea sediments, *Mar. Micropal.*, 1995, vol. 24, p. 307–334.
- Murdmaa I., Ivanova E., Duplessy J.-C., Levitan M., Khusid T., Bourtnan M., Alekhina G., Alekseeva T., Belousov M., Serova V. Facies system of the Eastern Barents Sea since the last glaciation to present, *Mar. Geol.*, 2006, vol. 230, p. 275–303.
- Nilsson T. Standardpollendiagramme und ¹⁴C Datierungen aus dem Ageröds Mosse in Mittleren Schonen, *Lunds Universitets Arsskrift*, 1964, avd. 2, bd. 59.
- Polyak L., Lehman S.J., Gataullin V., Jull A.J.T. Two-step deglaciation of the southeastern Barents Sea, *Geology*, 1995, vol. 23, p. 567–571.
- Polyak L., Mikhailov V. Post-glacial environments of the southeastern Barents Sea: foraminiferal evidence, J.T. Andrews et al. (eds.), Late Quaternary paleoceanography of the North Atlantic margins, *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1996, vol. 111, p. 323–337.
- Polyak L., Gataullin V., Okuneva O., Stelle V. New constraints on the limits of the Barents-Kata ice sheet during the Last Glacial Maximum based on borehole stratigraphy from the Pechora Sea, *Geology*, 2000, vol. 28, p. 611–614.
- Reille M. Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du nord. Laboratoire de Botanique Historique et Palynologie, Marseille, 1992, 520 p.
- Stein R. *Arctic Ocean sediments: processes, proxies, and paleoenvironment*, Amsterdam, Elsevier, 2008, 592 p.
- Stepanova A., Taldenkova E., Simstich J., Bauch H.A. Comparison study of the modern ostracod associations in the Kara and Laptev seas: Ecological aspects, *Mar. Micropal.*, 2007, vol. 63, p. 111–142.
- Stockmarr J. Tablets spores used in absolute pollen analysis, *Pollen Spores*, 1971, vol. 13, p. 616–621.
- Vernal de A., Rochon A., Turon J.-L., Matthiessen J. Organic-walled dinoflagellate cysts: palynological tracers of sea-surface conditions in middle to high latitude marine environments, *GEOBIOS*, 1997, vol. 30, p. 905–920.

Поступила в редакцию 29.06.2021
После доработки 13.12.2021
Принята к публикации 09.03.2022

ENVIRONMENTAL CHANGES IN THE CENTRAL DEEP OF THE BARENTS SEA DURING THE LATE GLACIAL AND THE HOLOCENE

O.V. Rudenko¹, E.E. Taldenkova², S.I. Shkarubo³, A.A. Rudenko⁴

¹ *Turgenev Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: olrudenko2011@yandex.ru*

² *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography, Leading Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: etaldenkova@mail.ru*

^{3,4} *Marine Arctic Geological Prospecting Expedition*

³ *Chief Geologist, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: sergeysh@mage.ru*

⁴ *Geologist of the 1st category, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: rudenko.aa@mage.ru*

Complex analysis of downcore variations in lithology and composition of microfossils such as pollen, spores, aquatic palynomorphs, benthic and planktonic foraminifera, and ostracods, in two sediment cores and comparison of the obtained results with published data on the structure of the Barents Sea shelf sediment sequence revealed three sediment units corresponding to the climatically determined stages in the evolution of postglacial sedimentation environments in the Central Deep of the Barents Sea. Spores, pollen and aquatic palynomorphs from this region were studied for the first time. The obtained data indicate a significant environmental transformation during the deglaciation period, i. e. from a glacier-proximal freshened marine basin with almost perennial sea-ice cover to a glacier-distal highly ice-covered basin, which was later replaced by a Holocene hemipelagic marine basin. The transition to marine type of sedimentation and the stabilization of normal marine environments are well reconstructed from fine-grained sediment composition, decrease in ice- and iceberg-rafted debris, lower proportion of redeposited spores and pollen, as well as from the appearance of dinoflagellate cysts, significant increase of the total abundance of microfauna and higher concentrations of pollen and spores. The most favorable conditions of the Middle Holocene are characterized by the growing taxonomic diversity of benthic foraminifera, appearance of subpolar planktonic foraminifera, and maximum of birch pollen in pollen spectra, which together indicate the increasing influence of Atlantic waters and wider distribution of birch formations on land.

Keywords: paleogeography, ice- and iceberg-rafted debris, pollen, spores, aquatic palynomorphs, foraminifers, ostracods

REFERENCES

- Birks H.H. South to north: Contrasting late-glacial and early-Holocene climate changes and vegetation responses between south and north Norway, *The Holocene*, 2015, vol. 5(1), p. 37–52.
- Blazhchishin A.I., Aibulatov N.A., Polyak L.V., Khairov M.B. [Structure and origin of the Upper Quaternary sediment sequence of the Near Novaya Zemlya region of the Barents Sea], *Problemy kainozoiskoi paleoekologii i paleogeografii morei Severnogo Ledovitogo okeana* [Issues of Cenozoic paleoecology and paleogeography of the Arctic seas], Proc. of the 3rd All-Union Conference, Apatity, 1989, p. 6–7. (In Russian)
- Duplessy J.-C., Cortijo E., Ivanova E., Khusid T., Labeyrie L., Levitan M., Murdmaa I., Paterne M. Paleooceanography of the Barents Sea during the Holocene, *Paleoceanography*, 2005, vol. 20, iss. 4, DOI: 10.1029/2004PA001116.
- Elverhøi A., Solheim A. The Barents Sea ice sheet – sedimentological discussion, *Polar Res.*, 1983, vol. 1, no. 1, p. 23–41.
- Fatela F., Taborda R. Confidence limits of species proportions in microfossil assemblages, *Mar. Micropal.*, 2002, vol. 45, p. 169–174.
- Gataullin V., Mangerud J., Svendsen J.I. The extent of the Late Weichselian ice sheet in the southeastern Barents Sea, *Glob. Planet. Change*, 2001, vol. 31, p. 453–474.
- Gataullin V.N., Polyak L.V. O prisutstvii lednikovyykh otlozhenii v Tsentral'noi vpadine Barentseva morya [About the presence of glacial deposits in the Central Deep of the Barents Sea], *Doklady AN SSSR*, 1990, vol. 314, no. 6, p. 1463–1467. (In Russian)
- Gataullin V.N., Polyak L.V., Epstein O.G., Romanyuk B.F. Glacigenic deposits of the Central Deep: a key to the Late Quaternary evolution of the eastern Barents Sea, *Boreas*, 1993, vol. 22, p. 47–58.
- Geologicheskaya karta Severnogo Ledovitogo okeana i sopredel'nykh territorii*, masshtab 1:1 500 000 [Geological map of the Arctic Ocean and adjacent territories, scale 1:1 500 000], Leningrad, VSEGEI Publ., 1983. (In Russian)
- Grimm E.C. *TGView*, Illinois State Museum, Research and Collections Center, Springfield, 2004.
- Grimm E.C. *TILIA 2.0, Version b.4 (Computer Software)*, Illinois State Museum, 1993.
- Hughes A.L.C., Gyllenkruetz R., Lohne Ø.S., Mangerud J., Svendsen J.I. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-1, *Boreas*, 2016, DOI: 10.1111/bor.12142. ISSN 0300-9483.
- Ivanova E.V. *Global'naya termohalinnaya paleotsirkulyatsiya* [Global thermohaline paleocirculation], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2006, 320 p. (In Russian)
- Ivanova E.V., Murdmaa I.O., Duplessy J.-C., Paterne M. Late Weichselian to Holocene paleoenvironments in the Barents Sea, *Glob. Planet. Change*, 2002, vol. 34, p. 209–218.

- Korsun S.A., Pogodina I.A., Tarasov G.A., Matishov G.G. *Foraminifery Barentseva morya (gidrobiologiya i chetvertichnaya paleoekologiya)* [Foraminifera of the Barents Sea (hydrobiology and Quaternary paleoecology)], Apatity, KNTs RAN Publ., 1994, 136 p. (In Russian)
- Kremenetski C., Vashchalova T., Goriachkin S., Cherkinsky A., Sulerzhitsky L. Holocene pollen stratigraphy and bog development in the western part of the Kola Peninsula, Russia, *Boreas*, 1997, vol. 26, p. 91–102.
- Kupriyanova L.A. *Palinologiya serezhkovykh* [Palynology of Amentaceae], Moscow, Nauka Publ., 1965, 215 p. (In Russian)
- Kupriyanova L.A., Aleshina L.A. *Pyl'tsa dvudol'nykh flory Evropeiskoi chasti SSSR* [Pollen of Dycotyledones of the European part of the USSR], Leningrad, Nauka Publ., 1972, 438 p. (In Russian)
- Lebedeva R.M. [Palynological levels in the Holocene sediments of the Kola Peninsula and their absolute stratigraphy], *Stratografiya i paleogeografiya chetvertichnogo perioda Severa Evropeiskoi chasti SSSR* [Stratigraphy and paleogeography of the Quaternary in the Northern European part of Russia], Petrozavodsk, Karel'skii filial of AN SSSR Publ., 1977, p. 29–39. (In Russian)
- Lenz M., Savelieva L., Frolova L., Cherezova A., Moros M., Baumer M.M., Gromig R., Kostromina N., Nigmatullin N., Kolka V., Wagner B., Fedorov G., Melles M. Lateglacial and Holocene environmental history of the central Kola region, northwestern Russia revealed by a sediment succession from Lake Imandra, *Boreas*, 2021, vol. 50, p. 76–100.
- Mangerud J., Birks H.H., Halvorsen L.S., Hughes A.L.C., Nashoug O., Nystuen J.P., Paus A., Sørensen R., Svendsen J.I. The timing of deglaciation and sequence of pioneer vegetation at Ringsaker, eastern Norway – and an earthquake-triggered landslide, *Norwegian J. of Geol.*, 2018, no. 98(3), p. 315–332.
- Matthiessen J. Distribution patterns of dinoflagellate cysts and other organic-walled microfossils in Recent Norwegian-Greenland Sea sediments, *Mar. Micropal.*, 1995, vol. 24, p. 307–334.
- Murdmay I., Ivanova E., Duplessy J.-C., Levitan M., Khusid T., Bourtnan M., Alekhina G., Alekseeva T., Belousov M., Serova V. Facies system of the Eastern Barents Sea since the last glaciation to present, *Mar. Geol.*, 2006, vol. 230, p. 275–303.
- Murdmay I.O., Ivanova E.V. Poslelednikovaya istoriya osadkonakopleniya v shel'fovykh vpadinakh Barentseva morya [Postglacial sedimentation history of the Barents Sea shelf depressions], *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 1999, no. 6, p. 576–595. (In Russian)
- Nilsson T. Standardpollendiagramme und ¹⁴C Datierungen aus dem Ageröds Mosse in Mittleren Schonen, *Lunds Universitets Arsskrift*, 1964, avd. 2, bd. 59.
- Paleopalynologiya* [Paleopalynology], I.D. Pokrovskaya (ed.), Leningrad, Nedra, 1966, vol. 1, p. 34–39. (In Russian)
- Pavlidis Yu.A., Ionin A.S., Shcherbakov F.A., Dunaev N.N., Nikiforov S.M. *Arkticheskii shel'f: pozdnechetvertichnaya istoriya kak osnovna prognoza razvitiya* [Arctic shelf: Late Quaternary history as a basis for evolution forecast], Moscow, GEOS, 1998, 187 p. (In Russian)
- Pogodina I.A., Tarasov G.A. Protsessy sedimentatsii i evolyutsii foraminifer vo vremya poslednei deglyatsii v Barentsevom more [Sedimentation processes and evolution of foraminiferic communities during the last deglaciation in the Barents Sea], *Okeanologiya*, 2002, vol. 42, no. 1, p. 156–160. (In Russian)
- Polyak L., Gataullin V., Okuneva O., Stelle V. New constraints on the limits of the Barents-Kata ice sheet during the Last Glacial Maximum based on borehole stratigraphy from the Pechora Sea, *Geology*, 2000, vol. 28, p. 611–614.
- Polyak L., Lehman S.J., Gataullin V., Jull A.J.T. Two-step deglaciation of the southeastern Barents Sea, *Geology*, 1995, vol. 23, p. 567–571.
- Polyak L., Mikhailov V. Post-glacial environments of the southeastern Barents Sea: foraminiferal evidence, J.T. Andrews et al. (eds.), *Late Quaternary paleoceanography of the North Atlantic margins*, *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1996, vol. 111, p. 323–337.
- Polyakova E.I. *Arkticheskie morya Evrazii v pozdnem kainozoe* [Eurasian Arctic seas during the Late Cenozoic], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 1997, 146 p. (In Russian)
- Reille M. *Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du nord*, Laboratoire de Botanique Historique et Palynologie, Marseille, 1992, 520 p.
- Rudenko A.V. Biostratografiya i korrelyatsiya pozdnepleistotsen-golotsenovykh osadkov yugo-zapadnoi chasti Barentseva morya [Biostratigraphy and correlation of the Late Pleistocene-Holocene sediments of the southwestern Barents Sea], *Novosti paleontologii i stratigrafii*, vol. 10, suppl. to *Geologiya i geofizika*, vol. 48, Novosibirsk, SO RAN Publ., 2008, p. 464–467. (In Russian)
- Sharapova A.Yu. *Verkhniy pleistotsen i golotsen Severnoi Fennoskandii i Barentseva morya (stratografiya, absolyutnaya khronologiya, paleogeografiya)* [Upper Pleistocene and Holocene of Northern Fennoscandia and the Barents Sea (stratigraphy, absolute chronology, paleogeography)], Dissertation abstract for the degree of the Doctor of Science in Geology and Mineralogy, SPb., 2005, 32 p. (In Russian)
- Spiridonov M.A., Rybalko A.E., Polyak L.V. [Stratigraphy of the Upper Quaternary deposits of the Novaya Zemlya shelf and paleogeography of the eastern Barents Sea during the Late Pleistocene and the Holocene], *Osadochyi pokrov glyatsial'nogo shel'fa severo-zapadnykh morei Rossii* [Sedimentary cover of the glacial shelf of the north-western seas of Russia], St. Petersburg, 1992, p. 47–68. (In Russian)
- Stein R. *Arctic Ocean sediments: processes, proxies, and paleoenvironment*, Amsterdam, Elsevier, 2008, 592 p.
- Stepanova A., Taldenkova E., Simstich J., Bauch H.A. Comparison study of the modern ostracod associations in the Kara and Laptev seas: Ecological aspects, *Mar. Micropal.*, 2007, vol. 63, p. 111–142.
- Stockmarr J. Tablets spores used in absolute pollen analysis, *Pollen Spores*, 1971, vol. 13, p. 616–621.
- Vernal de A., Rochon A., Turon J.-L., Matthiessen J. Organic-walled dinoflagellate cysts: palynological tracers of sea-surface conditions in middle to high latitude marine environments, *GEOBios*, 1997, vol. 30, p. 905–920.

Received 29.06.2021

Revised 13.12.2021

Accepted 09.03.2022

РОЛЬ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ИЗМЕНЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕОСИСТЕМ В СЕВЕРНОЙ ТАЙГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А.В. Хорошев¹, К.Н. Дьяконов², И.В. Воловинский³, Ю.Н. Бочкарев⁴, О.М. Подгорный⁵

^{1–5} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра физической географии и ландшафтоведения

⁴ Институт криосферы Земли ТЮМНЦ СО РАН

¹ Проф., д-р геогр. наук; e-mail: avkh1970@yandex.ru

² Зав. кафедрой, проф., чл.-кор. РАН; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru

³ Аспирант; e-mail: volovinskiy@gmail.com

⁴ Канд. геогр. наук, инженер I-й категории; e-mail: uboch@yandex.ru

⁵ Студент; e-mail: holgerd18@yandex.ru

Представлены результаты исследования по устойчивости функционирования северотаежных ландшафтов на севере Западно-Сибирской равнины в бассейне р. Надым в условиях современного потепления климата. Проведено сравнение видов зависимости между мерой пространственного варьирования годичных приростов кедр (*Pinus sibirica*) в XX–XXI вв. и характеристиками урочищ бугров пучения. Предполагалось, что теснота связи и виды зависимости могут меняться сопряженно с варьированием климатических факторов. Использованы 512 кернов из 39 фаций на вершинах и склонах бугров пучения. Для группы ландшафтных характеристик бугров проведено снижение размерности методом главных компонент. Рассчитаны коэффициенты корреляции Спирмена между параметрами порядка и приростами за каждый год с 1926 по 2013. Проверялись гипотезы о зависимости пространственного варьирования приростов от морфологических параметров бугров пучения и их фациальной структуры, о влиянии внутривековой изменчивости температур и осадков на связь между ландшафтными характеристиками и приростами кедр. Установлено, что кедровые древостои проявляют непостоянную чувствительность к морфологическим параметрам бугров пучения, что выражается в существенном варьировании тесноты корреляционной связи. В годы с особо высоким или низким фоном температур воздуха или количества осадков единый для ландшафта режим фитопродукционного функционирования распадается на разные варианты в зависимости от морфологических свойств урочищ. В холодные периоды повышенной фитопродуктивностью отличаются крупные бугры с высоким положением мерзлоты и слабовыраженным микрорельефом; в теплые периоды – небольшие бугры с большой мощностью сезонно-талого слоя. Фитопродукционная функция при глубоком положении кровли мерзлоты более стабильна. При современном потеплении увеличение приростов наблюдается только на относительно стабильных буграх со слабовыраженным микрорельефом. Полученные результаты показали, что крупномасштабный подход к исследованию реакции урочищ на изменения климата позволяет детализировать специфику фитопродукционного процесса, которая не может быть выявлена без использования ландшафтного подхода.

Ключевые слова: Западная Сибирь, бугор пучения, дендрохронология, кедр, рельеф, сезонно-талый слой, рельеф, вид зависимости, климатическая тенденция

ВВЕДЕНИЕ

Один из важнейших аспектов проблемы устойчивости ландшафтов – определение нормального диапазона варьирования характеристик функционирования. В 1970-х гг. были рассмотрены понятия устойчивости и изменчивости ведущих характеристик функционирования геосистем – годового местного стока и радиального прироста деревьев от двух ведущих факторов – годовых атмосферных осадков и радиационного баланса. Использован многолетний ряд характеристик за 40–50 лет для шести зон и подзон Западно-Сибирской равнины [Дьяконов, 1974].

Если варьирование каких-либо факторов претерпевает изменение и это отражается на изменчивости

функционирования, то в ряде случаев ландшафт переходит в другую область устойчивости с принципиальной сменой режима вплоть до формирования частично новой структуры. При этом структура ландшафта с новыми свойствами также влияет на функционирование геосистем (фаций) (рис. 1). Известно, что морфолито-генная основа в большой степени определяет характер других компонентов ландшафта. В связи с относительной инерционностью морфолито-генная основа может рассматриваться как «свойство – память» в пределах десятков – сотен лет. Смену диапазона варьирования свойства какого-либо мобильного компонента обычно связывают с трендом внешних условий (климат, антропогенное воздействие и др.). Однако бывают условия,

особенно в криолитозоне, когда морфолитогенная основа высокочувствительна к изменениям среды.

Геосистемы на северной границе тайги проявляют повышенную чувствительность к потеплению и изменению количества осадков [Ваганов и др., 1998]. Подробно изучены реакции биопродукционного процесса на климатические колебания по результатам дендрохронологических исследований [Наурзбаев и др., 2001; Astudillo-Sánchez et al., 2017; Долгова и др., 2018]. Меньше известно о локальных ландшафтных факторах. Бугры пучения особенно

чувствительны к климатическим изменениям [Васильчук и др., 2008]. Дендрохронологические данные показали, что потепление XXI в. привело к разрушению отдельных бугров пучения и образованию на их месте термокарстовых озер [Бочкарев, 2006, 2014; Дьяконов, Бочкарев, 2019]. При этом одни бугры разрушаются, другие устойчивы или растут.

В связи с высокой плотностью освоения севера Западной Сибири оценка устойчивости бугров пучения находится в центре внимания криолитологии и инженерной геологии [Москаленко, 2009; Казан-

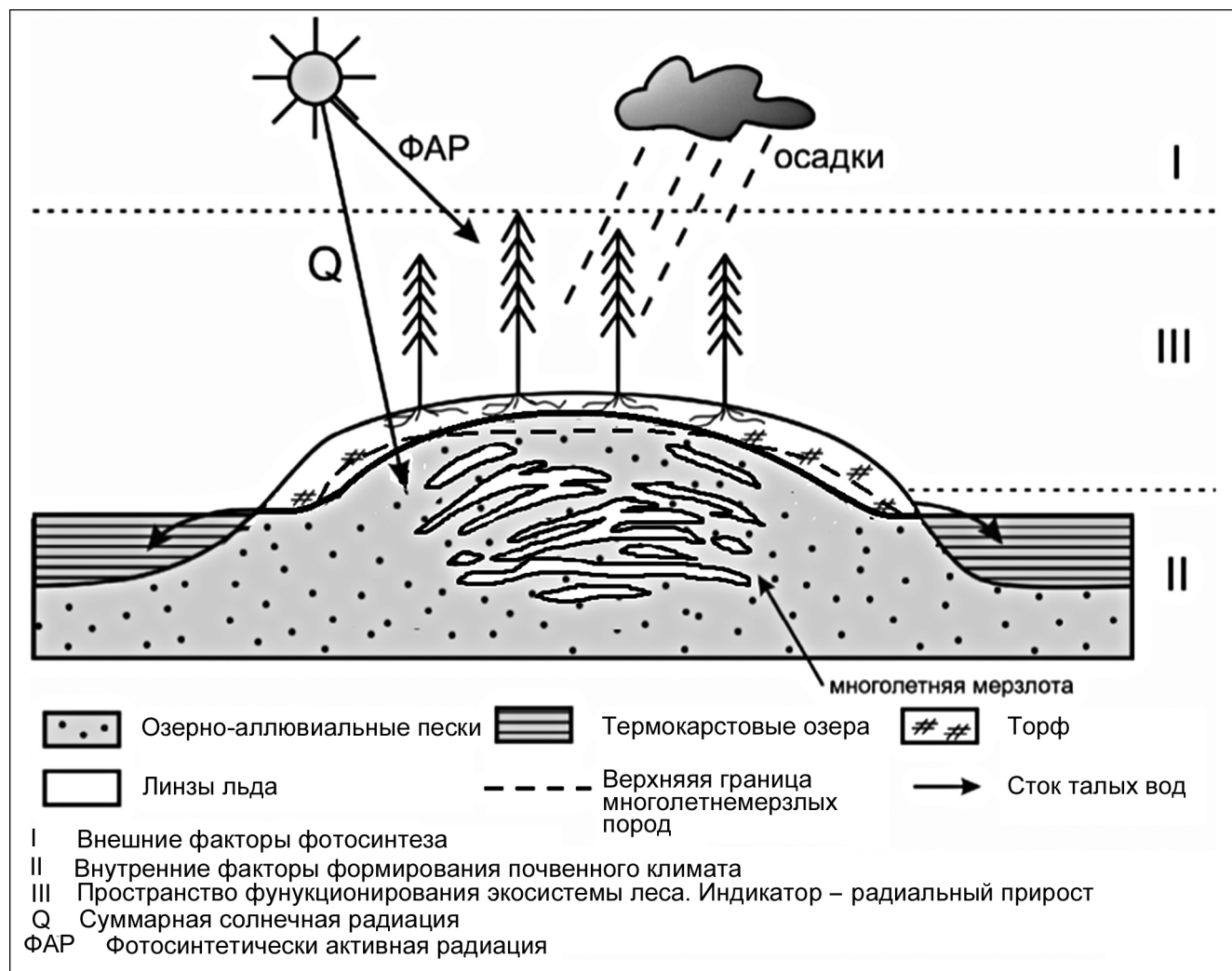


Рис. 1. Схема строения объекта исследования

Fig. 1. Scheme of the research object structure

цева, 2011]. Большой потенциал в решении этой проблемы имеет ландшафтный подход, который позволяет судить о состоянии бугров по функционированию растительного покрова и динамике пространственной структуры.

Цель исследования – оценить значимость изменяющихся ландшафтных свойств – факторов в

динамике фитопродукционного процесса с учетом климатических флуктуаций, используя методы дендрохроноиндикации.

Предмет исследования – изменчивость связей между ландшафтными характеристиками и приростами кедр на примере бугров пучения с редколесными фитоценозами.

Проверялись следующие гипотезы.

1. Пространственное варьирование приростов кедра определяется различиями морфологических параметров урочищ бугров пучения и их динамичной фациальной структурой.

2. Теснота связи и вид зависимости между ландшафтными характеристиками и приростами кедра могут меняться во времени.

3. Варьирование видов зависимости и тесноты связи во времени определяется внутривековой изменчивостью температур воздуха и атмосферных осадков.

ОБЪЕКТ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в северной тайге Западной Сибири на Надымском стационаре Института криосферы СО РАН (65° с. ш., 72° в. д.). На территории хорошо изучены мерзлота, почвы, растительность, ландшафтная структура [Ландшафты..., 1983; Пономарева и др., 2012, 2015; Москаленко, 2009; Бочкарев, 2014; Тархов и др., 2019].

Ландшафт представляет собой озерно-аллювиальную равнину с песчаными отложениями на морских суглинках и супесях с кедрово-лиственнично-сосновыми мохово-лишайниково-кустарничковыми лесами на языковатых подзолах. Междуречья представлены плоскобугристыми и крупнобугристыми

мерзлыми торфяниками (кустарничково-мохово-лишайниковыми по буграм и торфяно-моховыми по понижениям). В краевой переувлажненной части междуречной местности много минеральных и торфяно-минеральных сегрегационных бугров пучения – одиночных или в группах (рис. 1). Большинство бугров покрыто кедровыми мохово-лишайниково-осоково-багульниковыми редколесьями, некоторые безлесны или залесены частично.

Основной методологический подход – сравнение видов зависимости между мерой пространственного варьирования годичных приростов кедра и характеристиками ландшафтной структуры для периодов с разными гидротермическими условиями. Схема исследования представлена на рис. 2.

Дендрохронологические данные отбирались отдельно на склоне и на вершинной поверхности бугров. На каждой площадке буром Пресслера опробовано 10–15 деревьев. Всего отобрано с двух сторон дерева (наклона и в противоположную) 512 кернов. Анализ кернов осуществлен на оборудовании Lintab-5 с программным обеспечением TsapWin. Применен метод перекрестного датирования. Сравнивались дендрохронологические данные с двух сторон дерева. Построение графиков позволяло выявлять ошибки съемки колец (пропущенные и ложные); был использован индекс перекрестного датирования CDI [Tech, 2010].

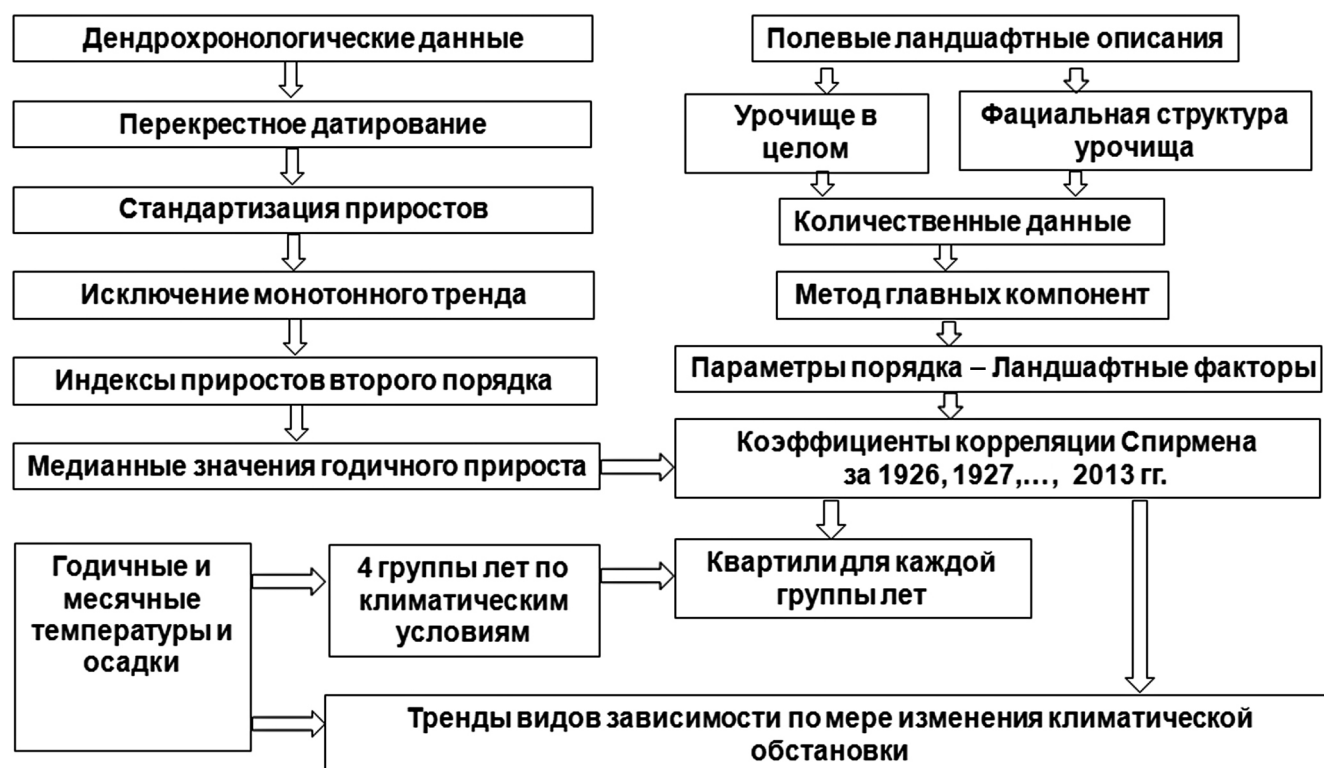


Рис. 2. Схема исследования видов зависимости между ландшафтными факторами и годичными приростами кедра

Fig. 2. Framework for studying relationships between landscape factors and cedar annual increments

Проведена стандартизация приростов деревьев. Сначала исключается монотонный тренд, затем к индексам прироста применено сглаживание сплайном для снятия длиннопериодических колебаний роста, обусловленных биологическими свойствами деревьев. В результате вычислены индексы второго порядка, т. е. индивидуальные хронологии. Затем они усреднялись в программе ARSTAN [Cook, Holmes, 1984] для получения обобщенной хронологии площадки. В качестве переменных взяты медианные значения индексов прироста второго порядка.

Для дальнейшего анализа использованы данные по 39 фациям, обеспеченным рядами дендрохронологических измерений с 1926 по 2013 г., частично – до 2019 г.

Характеристики бугров рассматривались как потенциальные предикторы динамики фитомассы: амплитуда микрорельефа, глубина криогенных трещин; мощность торфа и сезонно-талого слоя; высота, площадь, периметр, отношение площадь/периметр, крутизна склонов. Исходные переменные описывают варьирование пространственной структуры на уровнях внутриурочищном (внутренняя мозаичность бугра и свойства компонентов) и урочищном (параметры бугра как мезоформы рельефа).

Для статистического анализа использована программа Statistica 7.0. Проведено снижение размерности данных методом главных компонент без вращения. Выявлены параметры порядка или главные компоненты, каждый из которых описывает группу сопряженно варьирующих свойств урочищ и подчиняется тому или иному ландшафтному фактору. Для каждого года с 1926-го по 2013-й рассчитан непараметрический коэффициент корреляции Спирмена (ККs) как мера связи между численным значением каждого параметра порядка (координатами фаций на соответствующей оси ландшафтного фактора) и приростами за каждый год. Величина коэффициента характеризует тесноту связи, а ее знак – вид зависимости.

Использовались данные о температурах и осадках за год, зимний и летний сезоны по метеостанциям Салехард с 1884 г. и Надым с 1965 г. Выделены четыре группы климатических условий: холодные сухие, холодные влажные, теплые сухие и теплые влажные годы. В каждую группу попали 21 или 22 года. За основание для разделения групп приняты комбинации значений средних годовых температур и годовых сумм осадков ниже или выше среднего значения за 1926–2013 гг., соответственно $-6,1^{\circ}\text{C}$ и 427 мм по метеостанции Салехард (рис. 3). Для каждой группы климатических условий вычислены верхний и нижний квартили значений ККs, рассчитанных для каждого года. Верхний квартиль (число, больше которого 25% случаев из группы, т. е. 5–6 лет из 21–22) является нижней границей больших

по модулю положительных значений ККs. Нижний квартиль (число, меньше которого 25% случаев из группы) является верхней границей больших по модулю отрицательных значений ККs.

Основной предмет анализа – наличие трендов видов зависимости. Ландшафтные характеристики зафиксированы на момент полевых наблюдений. Поэтому делается допущение, что отклонение вида зависимости в какой-либо период от наблюдаемого ныне может быть обусловлено либо иной климатической обстановкой, либо иными свойствами ландшафтной структуры. О последней нет прямых данных, поэтому были использованы аэрофотоснимки Corona 1968 г. с разрешением 2 м и современные космоснимки GeoEye 1 2017–2019 гг. (разрешение 1 м). Эти данные позволяют оценить динамику роста термокарстовых озер с точностью до десятых долей процента. Сопоставление снимков показало рост площади термокарстовых озер на 1,9% (с 5,03 до 5,13 км²), в том числе за счет разрушения части бугров пучения.

Для оценки сопряженности временных рядов ККs (отдельно для каждого параметра порядка) и климатических характеристик проведена визуализация рядов на едином графике. Кривая аппроксимации построена методом локальной полиномиальной регрессии (LOWESS).

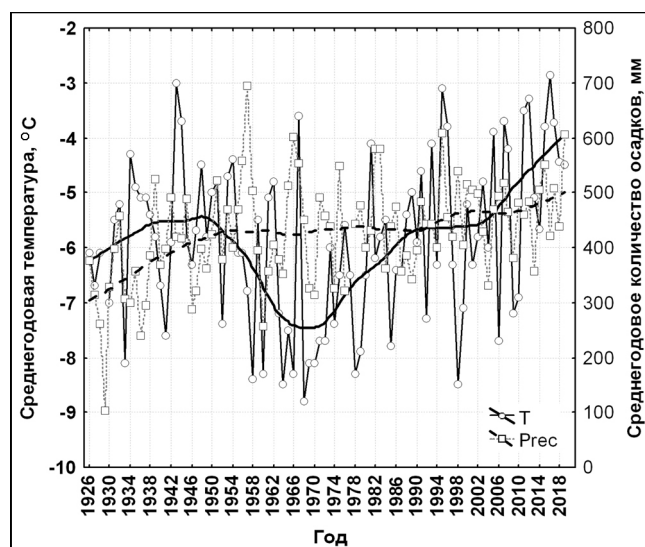


Рис. 3. Ход среднегодовых температур и годовых сумм осадков по метеостанции Салехард в 1926–2018 гг.:

T – температура воздуха; Prec – осадки.

Аппроксимирующие кривые построены методом локальной полиномиальной регрессии (LOWESS)

Fig. 3. The course of average annual temperatures and annual precipitation amounts at the Salekhard meteorological station in 1926–2013: T – temperatures; Prec – precipitation. The fitting curves were constructed using the local polynomial regression method (LOWESS)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пять параметров порядка в совокупности описывают 73% вариабельности ландшафтных характеристик (соответственно, 27, 16, 12, 10 и 8%). Для каждого фактора и группы климатических условий рассчитаны описательные статистики ККs между значениями фактора и приростами для разных групп климатических условий (табл.). Интерпретация факторов ландшафтной дифференциации основана на анализе факторных нагрузок для групп исходных переменных, региональных данных о зависимости характеристик бугров от интенсивности криогенных процессов [Ландшафты...,

1983; Пономарева и др., 2012, 2015], полевых наблюдениях авторов и корреляционных связях со свойствами почв.

Фактор 1 описывает плановые размеры бугров: чем больше размер бугра и *отношение площади к периметру*, тем меньше численное значение фактора. Этот фактор характеризует интенсивность притока влаги к ледяному ядру. На крупных буграх (более 10 тыс. м²), в отличие от малых, почти не встречается глубина сезонного протаивания более 50 см, т. е. они все «холодные». На малых буграх большая мощность сезонно-талого слоя (СТС) (80–200 см и более) сочетается с пониженной мощностью торфа – до 25 см.

Таблица

Описательные статистики коэффициентов корреляции Спирмена между значениями факторов дифференциации бугров пучения и годовыми приростами кедр для групп климатических условий по данным 1926–2013 гг.

Факторы	Статистика	Группы климатических условий			
		Холодные сухие годы	Холодные влажные годы	Теплые сухие годы	Теплые влажные годы
Фактор 1 (плановые размеры и форма бугра)	Нижний квартиль	–0,15	–0,06	–0,20	–0,14
	Минимум	–0,45	–0,50	–0,47	–0,46
	Верхний квартиль	0,09	0,16	0,09	0,2
	Максимум	0,38	0,31	0,42	0,38
Фактор 2 (мощность сезонно-талого слоя и торфа)	Нижний квартиль	–0,16	–0,06	–0,12	–0,09
	Минимум	–0,38	–0,23	–0,47	–0,31
	Верхний квартиль	0,07	0,07	0,12	0,13
	Максимум	0,15	0,33	0,21	0,33
Фактор 3 (амплитуда микрорельефа)	Нижний квартиль	–0,1	–0,17	–0,18	–0,06
	Минимум	–0,48	–0,41	–0,42	–0,32
	Верхний квартиль	0,16	0,13	0,03	0,09
	Максимум	0,30	0,38	0,24	0,45
Фактор 4 (высота и крутизна склонов бугра)	Нижний квартиль	–0,06	–0,08	–0,12	–0,13
	Минимум	–0,33	–0,29	–0,28	–0,21
	Верхний квартиль	0,08	0,08	0,13	0,13
	Максимум	0,29	0,30	0,20	0,32
Фактор 5 (глубина криогенных трещин)	Нижний квартиль	–0,19	–0,07	–0,09	–0,18
	Минимум	–0,34	–0,23	–0,26	–0,40
	Верхний квартиль	–0,03	0,1	0,21	0,13
	Максимум	0,32	0,15	0,35	0,27

Примечание. Разделение на сухие и влажные годы – относительно среднего годового количества осадков за 1926–2013 гг. по метеостанции Салехард (427 мм), на теплые и холодные годы – относительно среднего значения среднегодовой температуры (6,1°C).

Корреляционная связь между значениями фактора 1 и приростами кедр для большинства лет оказалась статистически недостоверной при $p < 0,05$ (рис. 4). Однако очевидны две закономерности. Во-первых, достоверные ККs (0,3–0,5) возникали

эпизодически в пиковые периоды фаз потепления и похолодания или при резко выраженном тренде температур. Во-вторых, имела место циклическая серия постепенных переходов от положительных к отрицательным связям и обратно. При этом сам

факт связи при KKs 0,2–0,3 означает наличие урочищ, для которых характерна нетипичная комбинация значений ландшафтного фактора и приростов, как правило для бугров с максимальными и минимальными плановыми размерами.

Достоверная связь типа «чем меньше значение фактора 1 (больше по площади и периметру бугор), тем больше приросты кедра» ($KKs < 0$) возникала преимущественно в сухие периоды (см. табл., рис. 3), которые могли быть и теплыми, и холодными. При потеплении и росте осадков (1940-е гг., см. рис. 3) увеличивалась частота реализации противоположного правила «чем меньше бугор, тем больше прирост кедра» с $KKs > 0$ (см. рис. 4). В период уменьшения годовых и зимних температур и высокой влажности (1950–1961) вновь дважды наблюдалась зависимость с повышенными приростами на крупных буграх, в частности в холодном влажном 1958 г. (рис. 5В). При подъеме температур с 1980-х гг. с одновременным увеличением количества осадков (почти во все годы – выше среднего за изучаемый

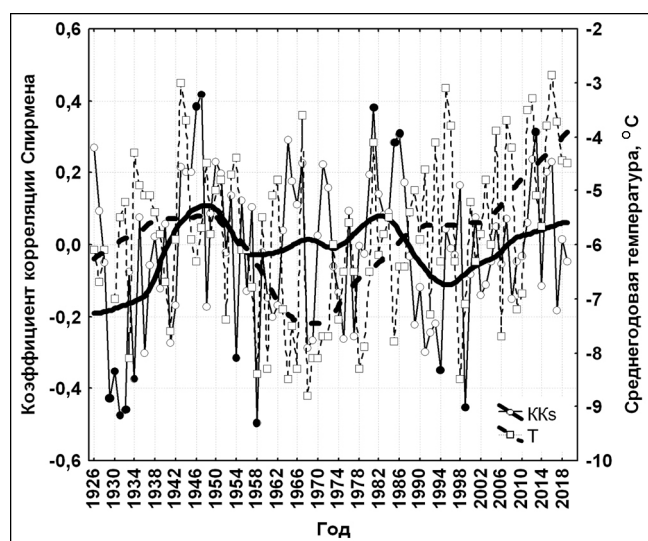


Рис. 4. Изменчивость коэффициентов корреляции Спирмена между годовыми приростами кедра и значениями фактора планового размера бугра (фактор 1) в связи с флуктуациями среднегодовых температур: KKs – коэффициент корреляции Спирмена; T – среднегодовая температура. Рост размера бугра соответствует уменьшению значения фактора. Черными кружками отмечены достоверные корреляции. Аппроксимирующие кривые получены методом локальной полиномиальной регрессии

Fig. 4. Temporal variability of Spearman's correlations between cedar annual increments and values of factor of plan frost mound size (factor 1) in connection with fluctuation of mean annual temperature: KKs – Spearman correlation coefficient; T – annual temperature. The larger the mound, the higher is factor value. Black circles mark significant correlations. Approximation curves were obtained by Robust locally weighted regression

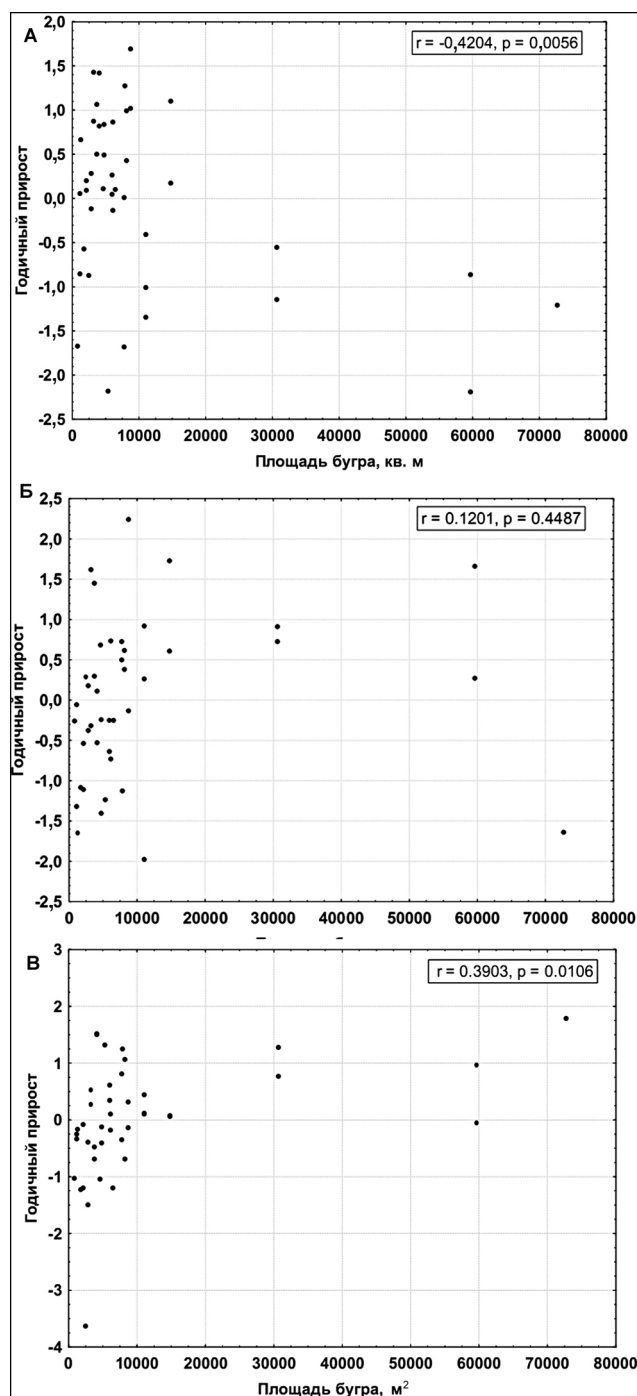


Рис. 5. Зависимость между площадью бугра и годовым индексом прироста кедра в теплом 2013 г. с влажной зимой (А), в холодном сухом 1999 г. (Б), холодном влажном 1958 г. (В): r – параметрический коэффициент корреляции Пирсона; p – уровень значимости. Непараметрические коэффициенты корреляции Спирмена см. рис. 3

Fig. 5. The relationship between the area of a frost mound and the annual cedar increment in warm 2013 with a humid winter (A), in a cold dry 1999 (B), and a cold wet 1958 (B): r – Pearson correlation coefficient; p – significance level. Spearman correlations see in Fig. 3

период) восстановилось правило, характерное для теплого периода 1940-х гг.: повышенный прирост кедра на малых буграх.

При активном потеплении с 2000 г. достоверные связи отсутствовали, однако в теплый (особенно летом) и влажный (особенно зимой) 2013 г. на всех крупных буграх приросты были минимальны, т. е. повторилось правило 1940-х гг. (см. рис. 5А). На большинстве малых бугров рост зимних и годовых осадков вызвал увеличение приростов, а на больших – снижение (см. рис. 5А). В холодные годы с сухой зимой (1999) сильное промерзание приводило к увеличению приростов на крупных буграх и уменьшению на большинстве малых (см. рис. 5Б). Итак, хотя в большинстве лет фактор планового размера бугра несуществен, в экстремальные по влажности или температурам годы крупные бугры отличаются от остальных по приростам кедра.

Фактор 2 описывает глубину сезонного протаивания (индикатор почвенного климата) в связи с теплоизолирующей ролью торфа: чем меньше мощность торфа и чем мощнее СТС, тем больше численное значение фактора. Поскольку вертикальный прирост торфа в регионе не превышает долей миллиметра в год [Болотные..., 2001], то изменение его мощности за изучаемый период (88 лет) можно считать несущественным. В сухие годы (как холодные 1930-е, так и теплые 1940-е и 1980-е) приросты возрастали на буграх с большой мощностью торфа и маломощным СТС, причем при наибольшей чувствительности к зимним условиям (рис. 6). По мере потепления и роста увлажнения (с 1990-х гг.) вид зависимости менял знак: приросты увеличивались при малой мощности торфа и большой мощности СТС.

Фактор 3 отражает внутриурочищное (фациальное) варьирование: чем больше амплитуда термокарстового микрорельефа, тем больше численное значение фактора. При похолодании в сухие годы устанавливается отрицательная связь значений фактора с приростами, но с запозданием на 5–7 лет по отношению к пикам похолодания (рис. 7): чем контрастнее микрорельеф, тем меньше приросты (рис. 8). В период быстрого снижения температур после потепления 1940-х гг. возникали положительные связи, т. е. контрастная фациальная структура с глубокими (1–2 м) микрозападинами благоприятствовала повышенным приростам. Однако с 2005 г. растет повторяемость отрицательных связей в годы с холодными зимами при большом количестве зимних осадков: чем контрастнее микрорельеф, тем меньше приросты.

Фактор 4 (высота бугра и крутизна его склонов) и фактор 5 (глубина криогенных трещин) имеют достоверную корреляцию с приростами реже, чем первые три фактора, соответственно всего 2 и 5 раз

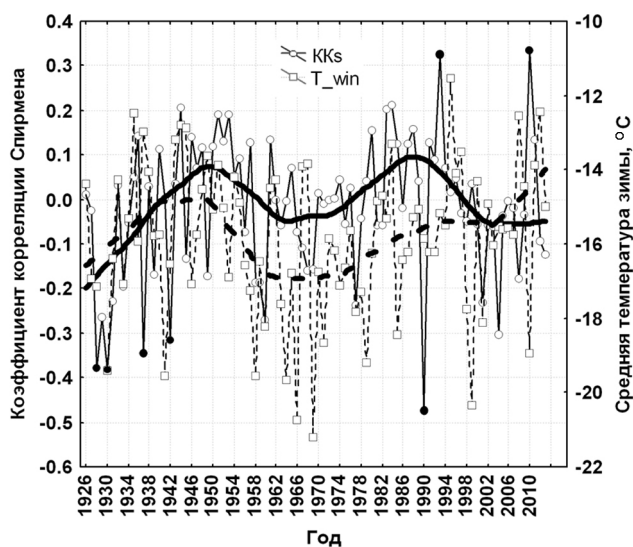


Рис. 6. Изменчивость коэффициентов корреляции Спирмена между годовыми приростами кедра и значениями фактора мощности сезонно-талого слоя (фактор 2) в связи с флуктуациями средней температуры зимнего периода: KKs – коэффициент корреляции Спирмена; T_{win} – температура зимнего периода. Рост мощности сезонно-талого слоя соответствует росту значений фактора. Черными кружками отмечены достоверные корреляции. Аппроксимирующие кривые получены методом локальной полиномиальной регрессии

Fig. 6. Temporal variability of Spearman's correlations between cedar annual increments and values factor describing thickness of seasonally-thawed layer (factor 2) in connection with fluctuation of mean winter temperature: KKs – Spearman correlation coefficient; T_{win} – mean winter temperature. The thicker seasonally-thawed layer, the higher factor value. Black circles mark significant correlations. Approximation curves were obtained by Robust locally weighted regression

за изучаемый период. Как и для вышеописанных факторов (см. рис. 4, 6, 7), выявлена цикличность смены знака связи. Однако нельзя не принимать во внимание, что наблюдаемые сейчас высота бугров и глубина криогенных трещин могут не отражать ситуацию несколько десятилетий назад [Пономарева и др., 2012]. По сути, нельзя быть уверенным, что иной знак связи, чем сейчас, не обусловлен изменением морфологии урочища и его фациальной структуры.

Зависимость приростов кедра от ландшафтных условий имеет место, но реализуется не ежегодно. Значимые связи возникают за счет небольшого количества бугров с нетипичными для ландшафта свойствами в годы с особо высокими или низкими показателями температур и осадков. При этом знак зависимости меняется согласованно с климатическими циклами.

Эпизодичность возникновения зависимости между рельефом и приростами свидетельствует

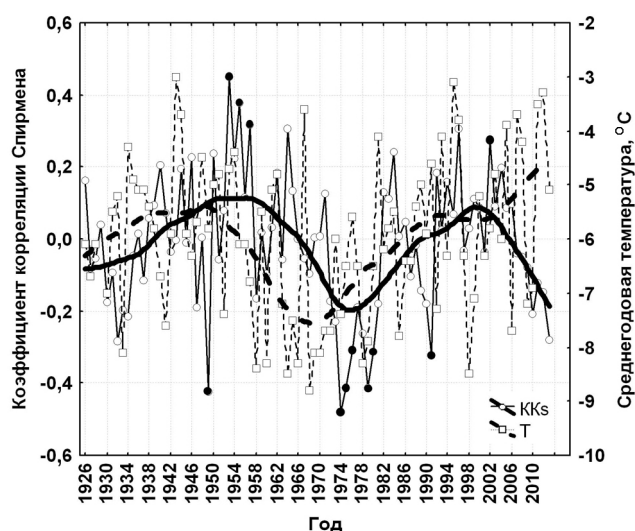


Рис. 7. Изменчивость коэффициентов корреляции между годовыми приростами кедров и значениями фактора амплитуды микрорельефа (фактор 3) в связи с флуктуациями средней годовой температуры: Ks – коэффициент корреляции Спирмена; T – среднегодовая температура. Рост амплитуды микрорельефа соответствует росту значений фактора. Черными кружками отмечены достоверные корреляции. Аппроксимирующая кривая получена методом локальной полиномиальной регрессии

Fig. 7. Temporal variability of Spearman's correlations between cedar annual increments and values of factor of microrelief elevation range (factor 3) in connection with fluctuation of mean annual temperature:

Ks – Spearman correlation coefficient; T – annual temperature. The larger microrelief elevation range, the higher factor value. Black circles mark significant correlations. Approximation curves were obtained by Robust locally weighted regression

о возможности нарушения синхронности фитопродукционного процесса в ландшафте. Фактически в обычных климатических условиях ландшафт функционирует как единое целое со сходным откликом урочищ на межгодовые различия тепло- и влагообеспеченности, но в экстремальные периоды теряет целостность фитопродукционного процесса и «распадается» на несколько видов геосистем.

Чувствительность фитопродукционного процесса к климатической динамике неодинакова на крупных (более 10 тыс. м²) и малых буграх. Объяснение, возможно, кроется в неодинаковой динамике мерзлого ядра. Большинство малых бугров представляют собой миграционные бугры пучения, чувствительные к обводненности среды [Мархтанов, 1999]. Высказывалось предположение, что крупные бугры могут быть не буграми пучения как таковыми, а остаточными поверхностями плоскобугристых торфяников [Бердников, 2012]. Позже было показано, что признаки пучения выражены более явно, чем термоостанцового происхождения [Бердников и др., 2019].

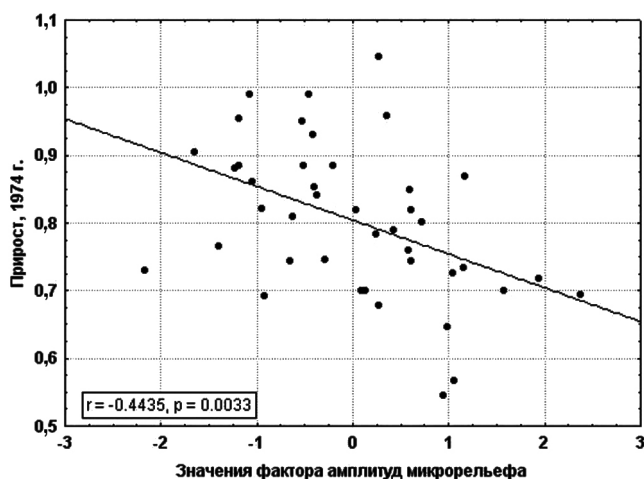


Рис. 8. Отрицательная зависимость приростов кедров в холодный 1974 г. от значений фактора амплитуд микрорельефа. Высокие значения фактора соответствуют большим амплитудам микрорельефа

Fig. 8. Negative correlation between cedar increments in cold year 1974 and factor of microrelief elevation range. High factor values correspond to high elevation range and high thickness of peat

Возникновение значимых связей только в годы с экстремальными величинами температур и осадков объясняется различием миграции влаги на буграх разного размера. Крупные бугры, в отличие от малых, обеспечивают более интенсивный фитопродукционный процесс в холодные сухие малоснежные годы, когда происходит активное нарастание мерзлого ядра за счет миграции влаги со стороны термокарстовых котловин и заболоченных понижений [Пономарева и др., 2015]. Если летом происходит привнос влаги с обильными дождями, то переувлажненность почв может нарастать за счет и осадков, и подтаивания вновь образованного мерзлого слоя.

На малых буграх, благодаря повышенной доле склоновых подурочищ, возможен более интенсивный сброс избыточной влаги по кровле мерзлого слоя с уменьшением оглеения почв. На крупных буграх из-за относительно плоской вершинной поверхности во влажные годы застойный водный режим способствует снижению фитопродукции, а в сухие – нет. На малых минеральных буграх с глубоким положением мерзлоты снижение приростов в сухие годы связано с усиленной фильтрацией в песчаные отложения, что может создавать стресс фитопродукционного процесса [Kharuk et al., 2019].

Древесные сообщества бугров с малой мощностью СТС увеличивали продуктивность в годы с пониженными осадками и, соответственно, с меньшим утепляющим эффектом. Известно, что при малой мощности торфа глубина протаивания возрастает сильнее, чем при большой. При современном потеплении продуктивность кедровых древостоев

на буграх с большой мощностью СТС стала выше, чем на буграх с малой глубиной оттаивания, но за исключением холодных лет. Рост тепло- и влагообеспеченности в последние 20 лет (см. рис. 3) имеет неоднозначный отклик в фитопродукционном процессе. Деревья, «привыкшие» к холодным почвам, не выдерживают сильного насыщения почв влагой и, возможно, активизации криотурбации и термокарста в теплые годы. Фитопродукционная функция при глубоком положении кровли многолетней мерзлоты более стабильна. Фактор стабильности кровли мерзлоты оказывается не менее значимым, чем климатический фактор.

ВЫВОДЫ

Дендрохроноиндикация функционирования локальных геосистем в условиях изменения климата свидетельствует о непостоянной зависимости древостоев от морфологических параметров бугров пучения, что выражается в существенном варьировании тесноты и знака корреляционной связи, т. е. о нестационарности процессов, связывающих фитоденозы, почвы и воды.

Преобладающие недостоверные связи между пространственной вариабельностью приростов и

характеристиками рельефа в годы с типичными погодными условиями свидетельствуют о едином режиме фитопродуцирования на большинстве бугров. В годы с особо высоким или низким фоном температур воздуха или осадков режим функционирования ландшафта распадается на разные варианты в зависимости от морфологических свойств урочищ.

Площадь бугров пучения выступает как ведущий фактор пространственной дифференциации приростов. В холодные периоды повышенной фитопродуктивностью отличаются крупные низкие бугры с высоким положением мерзлоты; в теплые периоды – небольшие бугры с большой мощностью сезонно-талого слоя. При современном потеплении увеличение приростов наблюдается только на относительно стабильных буграх со слабовыраженным микрорельефом.

Наши результаты показали, что крупномасштабный подход к исследованию реакции урочищ на изменения климата позволяет детализировать специфику фитопродукционного процесса, которая не может быть выявлена без использования ландшафтного подхода, при изучении только «репрезентативных» автономных объектов.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-05-00786) и госзадания географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова № 121051300176-1 «Факторы и процессы пространственно-временной организации природных и антропогенных ландшафтов». Авторы признательны О.Е. Пономаревой за содействие в организации полевых исследований и консультации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердников Н.М. Бугры пучения в различных ландшафтах бассейна реки Надым // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 3. С. 81–86.
- Бердников Н.М., Гравис А.Г., Дроздов Д.С., Пономарева О.Е., Москаленко Н.Г., Бочкарев Ю.Н. Лдистость многолетнемерзлых пород, слагающих бугры пучения в бассейне реки Надым // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 2. С. 29–37. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-2(29-37).
- Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / под ред. В.Б. Куваева. Тула: Гриф и К, 2001. 584 с.
- Бочкарев Ю.Н. Изучение внутривековой динамики ландшафтов северной тайги Западной Сибири методами дендрохронологии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2006. № 3. С. 6267.
- Бочкарев Ю. Н. Многолетняя динамика бугров пучения на севере Западной Сибири по данным дендрохронологии // Вопросы географии. Т. 138. М.: Кодекс, 2014. С. 251–270.
- Ваганова Е.А., Шиятов С.Г., Хантемиров Р.М., Наурзбаев М.М. Изменчивость летней температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария за последние 1,5 тыс. лет: сравнительный анализ данных годовичных колец деревьев и ледовых кернов // Доклады Академии наук. 1998. Т. 358. № 5. С. 681–684.
- Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чиждова Ю.Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. 571 с.
- Долгова Е.А., Мацковский В.В., Соломина О.Н. Дендрохронология Соловецких островов // География: развитие науки и образования. СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2018. С. 394–398.
- Дьяконов К.Н. Подходы к изучению устойчивости и изменчивости процессов в геосистемах // VII Совещание по вопросам ландшафтоведения (современное состояние теории ландшафтоведения). Пермь, 1974. С. 14–16.
- Дьяконов К.Н., Бочкарев Ю.Н. Дендрохроноиндикация эволюции парагенетической системы «бугры пучения – термокарстовые озера» // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 4. С. 15–23.
- Казанцева Л.А. Пространственная изменчивость ландшафтных и геокриологических условий естественных и нарушенных экосистем северной тайги Западной Сибири // Криосфера Земли. 2007. Т. XI. № 2. С. 14–18.

- Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газонной провинции. Новосибирск: Наука, 1983. 165 с.
- Марахтанов В.П. Механизм роста миграционных бугров пучения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1999. № 3. С. 41–46.
- Москаленко Н.Г. Изменение температуры пород и растительности под влиянием меняющегося климата и техногенеза в Надымском районе Западной Сибири // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 18–23.
- Наурзбаев М.М., Сидорова О.В., Ваганов Е.А. История климата позднего голоцена на востоке Таймыра по данным сверхдлительной древесно-кольцевой хронологии // Археология, этнография и антропология Евразии. 2001. № 3(7). С. 17–25.
- Пономарева О.Е., Гравис А.Г., Бердников Н.М. Современная динамика бугров пучения и плоскобугристых торфяников в северной тайге Западной Сибири (на примере Надымского стационара) // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 4. С. 21–30.
- Пономарева О.Е., Москаленко Н.Г., Бердников Н.М., Бляхарчук Т.А., Бочкарев Ю.Н., Устинова Е.В., Гравис А.Г., Лоботросова С.А., Матышак Г.В., Попов К.А., Сизов О.С., Якимов А.С. Трансформация криогенных геосистем южной части Арктики Западной Сибири под влиянием потепления климата // Научный вестник Ямало-Ненецкого АО. 2015. С. 123–130.
- Тархов М.О., Матышак Г.В., Рыжова И.М., Гончарова О.Ю., Бобрик А.А., Петров Д.Г., Петржик Н.М. Температурная чувствительность дыхания почв бугристых торфяников севера Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 8. С. 946–955. DOI: 10.1134/S0032180X1908015X.
- Astudillo-Sánchez C.C., Villanueva-Díaz J., Endara-Agramont A.R., Nava-Bernal G.E., Gómez-Albores M.A. Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: a dendrochronological approach, *Trees*, 2017, vol. 31(2), p. 441–453, DOI: 10.1007/s00468-016-1460-z.
- Cook E.R., Holmes R.L. Program ARSTAN, Users manual, Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, 1984, 15 p.
- Kharuk V.I., Ranson K.J., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Im S.T., Golyukov A.S. Larch (*Larix dahurica* Turcz.) growth response to climate change in the Siberian permafrost zone, *Regional Environmental Change*, 2019, vol. 19(1), p. 233–243, DOI: 10.1007/s10113-018-1401-z.
- Tech R. TSAP-WIN: Time series analysis and presentation dendrochronology and related applications, Heidelberg, Germany, 2010.

Поступила в редакцию 03.02.2021

После доработки 23.10.2021

Принята к публикации 09.03.2022

CONTRIBUTION OF MORPHOMETRIC AND CLIMATIC FACTORS TO THE VARIABILITY OF GEOSYSTEMS FUNCTIONING IN THE NORTHERN TAIGA OF WESTERN SIBERIA

A.V. Khoroshev¹, K.N. Dyakonov², I.V. Volovinsky³, Yu.N. Bochkarev⁴, O.M. Podgornyy⁵

^{1–3, 5} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science

⁴ Institute of the Earth's Cryosphere, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the RAS

¹ Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: avkh1970@yandex.ru

² Head of department, Professor, corresponding member of RAS; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru

³ Post-graduate student; e-mail: volovinskiy@gmail.com

⁴ Engineer, Ph.D. in Geography; e-mail: uboch@yandex.ru

⁵ Undergraduate student; e-mail: holgerd18@yandex.ru

The paper presents the results of a study on the stability of the functioning of northern taiga landscapes in the northern West Siberian Plain within the Nadym River basin under modern climate warming. We compared the types of dependence between the spatial variation in annual increments of cedar (*Pinus sibirica*) during the 20th–21st centuries and characteristics of frost mounds landscape units. We supposed that the correlation ratio and the types of dependence could change in line with the variation of climatic factors. 512 core samples from 39 facies were collected on the tops and slopes of frost mounds. The principal component analysis was applied to reduce the dimensionality of landscape attributes of the frost mounds. We calculated Spearman's correlations between order parameters and increments for each year from 1926 to 2013. We tested the hypotheses that the spatial variation in increments depend on the morphological parameters of frost mounds and their facies structure, as well as that the intrasecular variability of temperatures and precipitation affect the relationship between landscape characteristics and the increments of cedar. It was found that cedar stands exhibit variable sensitivity to the morphological parameters of frost mounds, which is expressed in significant variations of the correlation sign and value. In years with particularly high or low air temperatures or precipitation, a uniform landscape mode of phytoproductive functioning splits into different variants depending on the morphological properties of landscape units. In cold periods, large frost mounds with higher-lying permafrost and milder

microrelief are distinguished by increased phyto-productivity. In warm periods the increased increments are characteristic of small mounds with thicker seasonally thawed layer. The phytoproduction function is more stable in the units with deeper-lying permafrost. Under modern warming, the increments increase only on the relatively stable frost mounds with milder microrelief. The obtained results proved that a fine-scale approach to studying the response of urochishche landscape units to climate change provides the opportunity to clarify the specifics of phytoproduction process, which cannot be revealed without using the landscape approach.

Keywords: frost mound, dendrochronology, cedar, relief, seasonally thawed layer, microrelief, type of dependence, climatic trend

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 19-05-00786) and the state task of the MSU Faculty of Geography no. 121051300176-1 Factors and processes of spatio-temporal organization of natural and anthropogenic landscapes. The authors are grateful to O.E. Ponomareva for consultations and the assistance in the organization of field works.

REFERENCES

- Astudillo-Sánchez C.C., Villanueva-Díaz J., Endara-Agramont A.R., Nava-Bernal G.E., Gómez-Albores M.A. Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: a dendrochronological approach, *Trees*, 2017, vol. 31(2), p. 441–453, DOI: 10.1007/s00468-016-1460-z.
- Berdnikov N.M. Bugry pucheniya v razlichnykh landshaftakh basseina reki Nadym [Frost mounds in different landscapes of the Nadym River basin], *Kriosfera Zemli*, 2012, vol. XVI, no. 3, p. 81–86. (In Russian)
- Berdnikov N.M., Gravis A.G., Drozdov D.S., Ponomareva O.E., Moskalenko N.G., Bochkarev Yu.N. L'distost' mnogoletnemerzlykh porod, slagayushchikh bugry pucheniya v basseine reki Nadym [Ground ice content of frost mounds in the Nadym River basin], *Kriosfera Zemli*, 2019, vol. XXIII, no. 2, p. 29–37, DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-2(29-37). (In Russian)
- Bochkarev Yu. N. Mnogoletnyaya dinamika bugrov pucheniya na severe Zapadnoi Sibiri po dannym dendrokronologii [Long-term frost mounds dynamic in the north of Western Siberia according to dendrochronological data], *Voprosy geografii*, vol. 138, Moskva, Kodeks Publ., 2014, p. 251–270. (In Russian)
- Bochkarev Yu.N. Izuchenie vnutrivenkovoi dinamiki landshaftov severnoi taigi Zapadnoi Sibiri metodami dendrokronologii [Study of the intracentennial dynamics of northern taiga landscapes of Western Siberia using dendrochronological methods], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2006, no. 3, p. 62–67. (In Russian)
- Bolotnye sistemy Zapadnoj Sibiri i ih prirodoohrannoe znachenie [Mire systems of Western Siberia and their nature-protecting value], V.B. Kuvaev (ed.), Tula, Grif i K Publ., 2001, 584 p. (In Russian)
- Cook E.R., Holmes R.L. *Program ARSTAN users manual*, Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, 1984, 15 p.
- Dolgova E.A., Mackovskij V.V., Solomina O.N. [Dendrochronology of the Solovets islands], *Geografija: razvitie nauki i obrazovaniya* [Geography: progress of science and education], St Petersburg, RGPU im. A.I. Gercena Publ., 2018, p. 394–398. (In Russian)
- Dyakonov K.N., Bochkarev Yu.N. Dendrokronoindikatsiya evolyutsii parageneticheskoi sistemy bugry pucheniya – termokarstovye ozero [Dendrochronological indication of the evolution of “frost mound – thermokarst lakes” paragenetic system], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 4, p. 15–23. (In Russian)
- Dyakonov K.N. [Approaches to study of stability and variability of geosystem processes], *VII Soveshhanie po voprosam landshaftovedeniya (sovremennoe sostojanie teorii landshaftovedeniya)* [Actual state of theory of the landscape science], Perm', 1974, p. 14–16. (In Russian)
- Kazantseva L.A. Prostranstvennaya izmenchivost' landshaftnykh i geokriologicheskikh uslovii estestvennykh i narushennykh ekosistem severnoi taigi Zapadnoi Sibiri [Spatial variation in landscape and geocryological conditions of natural and disturbed ecosystems in the West Siberian northern taiga], *Kriosfera Zemli*, 2007, vol. XI, no. 2, p. 14–18. (In Russian)
- Kharuk V.I., Ranson K.J., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Im S.T., Golyukov A.S. Larch (*Larix dahurica* Turcz) growth response to climate change in the Siberian permafrost zone, *Regional Environmental Change*, 2019, vol. 19 (1), p. 233–243, DOI: 10.1007/s10113-018-1401-z.
- Landshafty kriolitozony Zapadno-Sibirskoi gazonosnoi provintsii [Landscapes of the permafrost zone of the Western Siberian gas province], Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 165 p. (In Russian)
- Marakhtanov V.P. Mekhanizm rosta migratsionnykh bugrov pucheniya [Growth mechanism of palsas], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 1999, no. 3, p. 41–46. (In Russian)
- Moskalenko N.G. Izmenenie temperatury porod i rastitel'nosti pod vliyaniem menyayushchegosya klimata i tekhnogeneza v Nadymskom raione Zapadnoi Sibiri [Permafrost and vegetation changes in the Nadym region of West Siberian northern taiga due to the climate change and technogenesis], *Kriosfera Zemli*, 2009, vol. XIII, no. 4, p. 18–23. (In Russian)
- Naurzbaev M.M., Sidorova O.V., Vaganov E.A. Istorija klimata pozdnego golocena na vostokey Tajmyra po dannym sverhdlitel'noj drevesno-kol'cevoj hronologii [Late Holocene climate history of Eastern Taimyr based on the extra-long-term tree ring chronology], *Arheologija, etnografija i antropologija Evrazii*, 2001, no. 3 (7), p. 17–25. (In Russian)
- Ponomareva O.E., Gravis A.G., Berdnikov N.M. Sovremennaya dinamika bugrov pucheniya i ploskobugristykh torfyanikov v severnoi taige Zapadnoi Sibiri (na primere Nadymskogo statsionara) [Contemporary dynamics of frost mounds and flat peatlands in north taiga of West Siberia (on the example of Nadym site)], *Kriosfera Zemli*, 2012, vol. XVI, no. 4, p. 21–30. (In Russian)
- Ponomareva O.E., Moskalenko N.G., Berdnikov N.M., Blyakharchuk T.A., Bochkarev Yu.N., Ustinova E.V.,

- Gravis A.G., Lobotrosova S.A., Matyshak G.V., Popov K.A., Sizov O.S., Yakimov A.S. Transformatsiya kriogennykh geosistem yuzhnoi chasti Arktiki Zapadnoi Sibiri pod vliyaniem potepleniya klimata [Transformation of cryogenic geosystems in the southern part of the Arctic of Western Siberia under the influence of climate warming], *Nauchnyi vestnik Yamalo-Nenetskogo AO*, 2015, no. 2, p. 123–130. (In Russian)
- Tarkhov M.O., Matyshak G.V., Ryzhova I.M., Goncharova O.Yu., Bobrik A.A., Petrov D.G., Petrzhek N.M. Temperature sensitivity of soil respiration in palsa peatlands of the north of Western Siberia, *Eurasian Soil Science*, 2019, no. 8, p. 945–953.
- Tech R. *TSAP-WIN: Time series analysis and presentation dendrochronology and related applications*, Heidelberg, Germany, 2010.
- Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Khantemirov R.M., Naurzbaev M.M. The variability of summer air temperature at high latitudes in the Northern Hemisphere for the last 1.5 ka: a comparative analysis of the data on annual tree rings and ice cores, *Doklady Earth Sciences*, 1998, vol. 359, no. 2, p. 267–270.
- Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.K., Budantseva N.A., Chizhova Yu.N. *Iypuklye bugry pucheniya mnogoletnemerzlykh torfyanykh massivov* [Palsa of frozen peat mires], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2008, 571 p. (In Russian)

Received 03.02.2021

Revised 23.10.2021

Accepted 09.03.2022

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 5. ГЕОГРАФИЯ»

Общие требования к статье

Журнал «Вестник Московского университета. Серия 5. География» публикует результаты оригинальных исследований в различных областях географической науки, теоретические, методические и обзорные статьи, представляющие интерес для мирового научного сообщества. Представленные к опубликованию материалы должны соответствовать формальным требованиям журнала, пройти процедуру слепого рецензирования и получить рекомендацию к публикации на заседании редколлегии журнала. Решение о публикации принимается на основе научной значимости и актуальности представленных материалов. Статьи, отклоненные редакционной коллегией, повторно не принимаются и не рассматриваются.

Объем статьи (текст, таблицы, список литературы, рисунки, перевод на английский) не должен превышать 1 а. л. (40 тыс. печатных знаков, включая пробелы, 5 рисунков), не более 50 тыс. знаков для обзорных статей. Объем кратких сообщений составляет 0,25 а. л. Рекомендуемый список литературы – до 30 наиболее актуальных работ по рассматриваемому вопросу. В обзорных статьях список литературы не должен превышать 60 источников. Для кратких сообщений список литературы может быть до 10 источников. Самоцитирований в списке литературы не должно быть более 10% от общего числа использованных источников.

Статья должна быть четко структурирована и включать рубрики: введение; материалы и методы исследований; результаты исследований и их обсуждение; выводы; список литературы.

Все материалы статьи компонуются **в единый сводный файл в формате Word** и размещаются в нем в следующей последовательности:

1. УДК;
2. Название статьи;
3. Инициалы и фамилия автора(ов);
4. Для каждого автора приводится полное название учреждения, в котором выполнялось исследование, подразделение (кафедра, лаборатория и т. п.), уч. степень, должность, *e-mail*;
5. Аннотация статьи;
6. Ключевые слова;
7. Текст статьи;
8. Благодарности, в том числе – финансирование;
9. Список литературы;
10. Таблицы;
11. Подписи;
12. Рисунки;
13. Перевод на английский язык пунктов 2–6, 8–9;
11. В пункте 4 просьба использовать в переводе официальное наименование организации на английском языке (а не собственный вариант перевода).

Подготовка текста

Текст набирается 12 кеглем через один интервал, поля слева, сверху и снизу – 2 см, справа – 1,5 см. Не допускается использование табулятора или пробелов для обозначения абзаца, ручных переносов в словах, переносов строк клавишей Enter в рамках одного предложения, разрывов страниц и разделов. В тексте статьи возможно использование полужирного шрифта и курсива для смысловых выделений, однако не должно использоваться подчеркивание. Десятичная часть чисел отделяется запятой.

Формулы набираются в редакторе формул в отдельную строку и имеют сквозную нумерацию по всей статье, выровненную по правому краю строки.

Таблицы набираются в Word, не допускается разделение ячеек косой линией. Ручные переносы не допускаются.

Рисунки представляются отдельными файлами, названными по их номерам (например: рис.1.tiff, рис.2.jpg), в графическом формате (eps, tif, jpg) разрешением не менее 300 dpi для полутонных и 600 dpi для черно-белых изображений и графиков. Для графиков, выполненных в Excel, дополнительно прилагаются соответствующие файлы Excel. Картинки должны быть полностью готовы к изданию. Представление рисунков в виде схем Word или набранного текста с добавлением графических элементов, наложенных сверху, **не допускается**.

Ссылка на источник в тексте документа указывается в квадратных скобках. В тексте ссылки через запятую указывается фамилия автора и год издания. Если ссылок несколько – они отделяются друг от друга точкой с запятой. Ссылка на источник на иностранном языке указывается на языке оригинала. Список русскоязычной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1–2003, 7.82–2001 и 7.0.5–2008. DOI (при наличии) указывается в конце ссылки. Ссылка на источник на английском языке оформляется единообразно и в русскоязычном, и в переведенном на английский язык списке литературы. **При наличии у русскоязычного издания, которое фигурирует в списке литературы, оригинальной или переводной англоязычной версии в ссылке должна быть указана именно она, а не русскоязычный вариант.**

Более подробные инструкции по подготовке статей для авторов можно найти на сайте журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Статьи, оформленные не по правилам, будут возвращаться автору на переработку.

Статьи принимаются на географическом факультете в редакции, через сайт журнала и по электронной почте.

Редакция: комната 2108а, тел. +7(495)9392923. Сайт журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Электронная почта: vestnik_geography@mail.ru.

Плата за публикацию не взимается

УЧРЕДИТЕЛИ:

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
географический факультет МГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

С.А. ДОБРОЛЮБОВ, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН (главный редактор)
В.С. ТИКУНОВ, доктор географических наук, профессор (зам. главного редактора)
Е.А. ЕРЕМЕНКО, кандидат географических наук (ответственный секретарь)
А.И. АЛЕКСЕЕВ, доктор географических наук, профессор
С.И. БОЛЫСОВ, доктор географических наук, профессор
А.Н. ГЕННАДИЕВ, доктор географических наук, профессор
К.Н. ДЬЯКОНОВ, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН
С.С. ЗИЛИТИНКЕВИЧ, доктор географических наук, профессор (Метеорологический институт Финляндии)
О.Г. ЗОЛИНА, профессор (Университет Ж. Фурье, г. Гренобль, Франция)
В.Ю. ИВАНОВ, профессор (Мичиганский университет, США)
Н.С. КАСИМОВ, доктор географических наук, профессор, академик РАН
А.В. КИСЛОВ, доктор географических наук, профессор
В.А. КОЛОСОВ, доктор географических наук, профессор
К.П. КОЛТЕРМАНН, профессор
М. КОНЕЧНЫ, профессор (Университет г. Брно, Чешская Республика)
С.Б. КРООНЕНБЕРГ, профессор (Технологический университет г. Делфт, Нидерланды)
С.М. МАЛХАЗОВА, доктор географических наук, профессор
Г. МОУРИ, профессор (Университет г. Токио, Япония)
С.А. СОКРАТОВ, кандидат географических наук, PhD
П.Е. ТАРАСОВ, доктор наук, профессор (Берлинский Свободный университет, Германия)
Н.Л. ФРОЛОВА, доктор географических наук, профессор
В.Е. ШУВАЛОВ, кандидат географических наук, доцент
Т.А. ЯНИНА, доктор географических наук, профессор
В.В. ЯНКО-ХОМБАХ, доктор геолого-минералогических наук, профессор (Институт прикладных исследований Авалон, г. Виннипег, Канада)

EDITORIAL BOARD:

S.A. DOBROLUBOV, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor (Editor-in-chief)
V.S. TIKUNOV, doctor of science, professor (Deputy Editor-in-chief)
E.A. EREMENKO, candidate of science (Secretary-General)
A.I. ALEKSEEV, doctor of science, professor
S.I. BOLYSOV, doctor of science, professor
A.N. GENNADIYEV, doctor of science, professor
K.N. D'YAKONOV, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor
S.S. ZILITINKEVICH, doctor of science, professor (Finnish Meteorological Institute, Finland)
O.G. ZOLINA, professor (Fourier University, Grenoble, France)
V.YU. IVANOV, professor (Michigan University, USA)
N.S. KASIMOV, doctor of science, academician of the Russian Academy of Sciences, professor
A.V. KISLOV, doctor of science, professor
V.A. KOLOSOV, doctor of science, professor
K.P. KOLTERMANN, professor
M. KONECNÝ, professor (Masaryk University, Faculty of Science, Czech Republic)
S.B. KROONENBERG, professor (Delft University of Technology, Department of Applied Earth Sciences, Netherlands)
S.M. MALKHAZOVA, doctor of science, professor
G. MOURI, professor (University of Tokyo, Japan)
S.A. SOKRATOV, candidate of science, PhD
P.E. TARASOV, professor (Free Berlin University, Germany)
N.L. FROLOVA, doctor of science, professor
V.E. SHUVALOV, candidate of science, associate professor
T.A. YANINA, doctor of science, professor
V.V. YANKO-KHOMBACH, doctor of science, professor (Avalon Institute of Applied Sciences, Winnipeg, Canada)

Номер подготовили члены редколлегии

В.А. КОЛОСОВ, С.М. МАЛХАЗОВА

Редактор **Е.С. Повалишникова**

Адрес редколлегии:

119992, Москва, Ленинские горы, МГУ,
географический факультет, комн. 2108а. Тел. 7(495) 939-29-23

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.
Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.

Подписано в печать 00.00.2016. Формат 60×90/8.
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсет. № 1. Офсетная печать. Усл. печ. л. 19,2
Уч.-изд. л. 00. Тираж экз. Изд. № 00000. Заказ №

Типография МГУ.

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15.